

**Et si le temps
n'existait pas? Un
peu de science
subversive**

Rovelli

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

CARLO **ROVELLI**

ET SI LE TEMPS N'EXISTAIT PAS ?

UN PEU DE SCIENCE
SUBVERSIVE



DUNOD

Copyright Dunod, 2012

9782100579495

Ce texte est une version augmentée par l'auteur d'un
ouvrage paru en italien en 2004 aux éditions Di Renzo :
Che cos'è il tempo ? Che cos'è lo spazio ?

Version française révisée par Elisa Brune.

Réalisation de la couverture : Mister Atomic

Conception de la couverture : Raphaël Tardif

Visitez notre site Web : www.dunod.com

Consultez le [site Web de cet ouvrage](#)

Le code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des paragraphes 2 et 3 de l'article L122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, sous réserve du nom de l'auteur et de la source, que « les analyses et les courtes citations justifiées par le caractère critique, polémique, pédagogique, scientifique ou d'information », toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, faite sans consentement de l'auteur ou de ses ayants droit, est illicite (art. L122-4). Toute représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, notamment par téléchargement ou sortie imprimante, constituera donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle.

Préface

Carlo Rovelli est physicien théoricien et compte parmi les initiateurs de la théorie de la gravité quantique à boucles, un sujet d'une difficulté mathématique effrayante. Pourtant, lorsque je l'ai rencontré et entendu dans une réunion interdisciplinaire, il s'est montré capable de parler de son travail de façon si claire qu'un adolescent de quinze ans l'aurait suivi de bout en bout. Et non seulement aurait-il suivi l'exposé, mais sans doute aurait-il suivi l'orateur à la fin de la séance pour lui demander comment devenir physicien à son tour.

Carlo Rovelli travaille à la pointe de la technique, mais il ne cède jamais au plaisir de la voltige pour elle-même. Il garde à l'œil les questions qu'il cherche à résoudre. Cette conscience des enjeux fait de lui un vulgarisateur magique. Schématiquement, de manière limpide, il brosse le tableau de la physique fondamentale pour en éclairer les failles – ces questions ouvertes qui engloutissent les physiciens d'aujourd'hui.

Puis, au-delà de la physique, c'est la science dans son ensemble, ses rapports avec les autres domaines de connaissance et son rôle dans la société, qu'il interroge. Le physicien n'est pas, ne peut pas être, un technicien déconnecté des réalités – puisque c'est de la réalité qu'il prétend parler. Le monde qu'il interroge dans l'accélérateur de particules et le monde où il s'éveille chaque matin ne font qu'un. Mieux que tout autre scientifique, Carlo Rovelli nous fait sentir cette intense connexion de l'activité du chercheur avec le bourdonnement du monde.

L'éditeur italien Sante Di Renzo a eu la clairvoyance de solliciter Carlo Rovelli pour concevoir avec lui un texte destiné aux jeunes qui seraient curieux d'embrasser la carrière scientifique. De plusieurs entretiens sur le parcours du physicien est né l'ouvrage *Che cos'è il*

tempo ? Che cos'è lo spazio ?

Lorsque j'eus moi-même l'idée de le publier, après l'avoir entendu en conférence, Carlo Rovelli me proposa de reprendre ce texte en le développant à la fois dans le sens du contenu scientifique et dans sa réflexion sur la science. C'est donc un texte plus pointu et plus large, un véritable « cône de pensée » qui nous est donné à lire ici. On y apprend où va la physique de demain et pourquoi elle rejoint Aristote, à quoi ressemble un « grain » d'espace-temps et comment l'étude de ce genre de questions peut jouer un rôle important dans le chemin de la civilisation.

Plus qu'un ouvrage de science, c'est une démonstration d'esprit scientifique, cette tournure d'esprit si naturelle aux enfants, si difficile à garder.

Elisa Brune

Journaliste scientifique

Rébellion et rêves

Bien que j'aie consacré une grande partie de ma vie à la recherche scientifique, la science a été chez moi une passion tardive. Quand j'étais jeune, le monde entier me fascinait, mais pas la science en particulier.

Je suis né et j'ai grandi en Italie, à Vérone, dans une famille tranquille. Mon père, un homme d'une rare intelligence, discret et réservé, était ingénieur et dirigeait sa propre entreprise. Il m'a transmis le plaisir de regarder le monde avec curiosité. Ma mère, vraie mère italienne débordante d'un amour excessif pour son seul enfant, m'apportait son aide dans les « recherches » que j'effectuais pour l'école primaire, et encourageait mon goût pour découvrir et apprendre en permanence.

J'ai fréquenté le Lycée classique à Vérone. On y étudiait le grec et l'histoire beaucoup plus que les maths. C'était un établissement riche en stimulants culturels, mais prétentieux et provincial, campé sur sa mission de protection des privilèges et de l'identité de la bourgeoisie locale. Plusieurs enseignants avaient été des fascistes ardents avant de perdre la guerre, et l'étaient encore dans le secret de leur cœur. C'étaient les années soixante et soixante-dix, et le conflit entre les générations faisait rage. Le monde changeait rapidement. La plupart des adultes autour de moi avaient du mal à accepter cette évolution ; ils se raidissaient dans des positions défensives et stériles. Je faisais peu confiance au monde des adultes, et encore moins à mes professeurs. J'entrais constamment en conflit avec eux et avec toute figure d'autorité.

Mon adolescence fut de plus en plus une période de révolte. Je ne me reconnaissais pas dans les valeurs exprimées autour de moi. La confusion était grande, et rien ne me semblait certain. Une chose seule m'était claire : le monde que je voyais était très différent de celui qui m'aurait semblé juste et beau. Je rêvais de devenir vagabond barbu et de rester à l'écart de ce monde qui ne me plaisait pas. Je lisais avec avidité. Les livres me parlaient d'autres mondes et d'idées différentes. Il me semblait qu'il devait y avoir de merveilleux trésors cachés dans chaque livre que je n'avais pas encore lu.

Pendant mes études universitaires à Bologne, ma confusion et mon conflit avec le monde adulte ont rejoint le parcours commun d'une grande partie de ma génération. Nous voulions changer le monde, le

rendre meilleur, moins injuste ; trouver de nouvelles façons de vivre et d'aimer ; expérimenter de nouvelles manières de vivre ensemble ; bref, tout essayer. Nous tombions amoureux tout le temps et discussions à l'infini. Nous voulions apprendre à voir les choses sans *a priori*. Il y avait des moments de désarroi, et d'autres qui laissaient entrevoir l'aube d'un monde merveilleusement neuf.

C'était une époque où l'on vivait de rêves. On voyageait beaucoup : par la pensée, et par la route en quête de nouveaux amis et de nouvelles idées. À l'âge de vingt ans, j'ai décidé de partir pour un long voyage en solitaire autour du globe. Je voulais aller à l'aventure et y chercher « la vérité ». Aujourd'hui, à l'approche de la cinquantaine, cette naïveté me fait sourire. Mais il me semble quand même que le choix a été bon : d'une certaine façon je poursuis toujours une aventure qui a commencé à cette époque. Le chemin n'a pas toujours été facile, mais les espoirs fous et les rêves sans limites ne m'ont pas abandonné ; il fallait seulement avoir le courage de les suivre.

Avec un groupe d'amis, nous avons animé une des premières « radios libres » de cette époque, *radio Alice*, à Bologne. Le micro était totalement ouvert à quiconque voulait s'exprimer à la radio, et *radio Alice* brassait les expériences et les rêves. Avec deux de ces amis, nous avons rédigé un livre qui raconte cette rébellion étudiante italienne de la fin des années soixante-dix.

Mais rapidement les rêves de révolution ont été étouffés et l'ordre a repris le dessus. On ne change pas le monde si facilement.

À mi-chemin de mes études universitaires, je me suis retrouvé encore plus perdu qu'avant, avec le sentiment amer que ces rêves partagés par la moitié de la planète étaient déjà en train de s'évanouir pour beaucoup de mes condisciples, et sans la moindre idée de ce que j'allais faire de ma vie. Rejoindre la course à l'ascension sociale, faire carrière, gagner de l'argent et grappiller des miettes de pouvoir, tout cela me semblait bien trop triste. Je ne pouvais pas m'y résoudre. Heureusement, le monde entier restait à explorer, et derrière les montagnes j'imaginais toujours des horizons sans borne.

La recherche scientifique est alors venue à ma rencontre – j'ai vu en elle un espace de liberté illimité, ainsi qu'une aventure aussi ancienne qu'extraordinaire. Jusque-là, j'étudiais parce que je devais passer des examens, et surtout pour ne pas partir tout de suite au service militaire obligatoire ; mais bientôt les matières que j'étudiais ont commencé à m'intéresser, et ensuite à me passionner, de plus en plus.

En troisième année du programme de physique, on rencontre la « nouvelle » physique, celle du XX^e siècle : la mécanique quantique et la théorie de la relativité d'Einstein. Ce sont des idées fascinantes, des révolutions conceptuelles extraordinaires qui transforment notre

vision du monde et bouleversent les vieilles idées, y compris celles que l'on considérerait comme les plus solides. À travers elles, on découvre que le monde n'est pas du tout comme on le pensait. On apprend à voir les choses d'un œil tout différent. C'est un formidable voyage de pensée. Ainsi, j'ai glissé d'une révolution culturelle avortée vers une révolution de pensée en cours.

Avec la science, j'ai découvert un mode de pensée qui d'abord établit des règles pour comprendre le monde, puis devient capable de modifier ces mêmes règles. Cette liberté, dans la poursuite de la connaissance, me fascinait. Poussé par ma curiosité, et peut-être par ce que Federico Cesi, ami de Galilée et visionnaire de la science moderne, appelait « le désir naturel de savoir », je me suis retrouvé, presque sans m'en rendre compte, immergé dans des problèmes de physique théorique.

Mon intérêt pour cette discipline est donc né par accident et par curiosité plus que par un choix conscient. Au Lycée, j'étais bon en mathématiques, mais je me sentais surtout attiré par la philosophie. Si, à l'université, j'avais choisi d'étudier la physique et non la philosophie, c'était surtout parce que, dans mon dédain naïf des institutions établies, je considérais les problèmes philosophiques comme trop sérieux et trop importants pour qu'on en discute à l'école...

Ainsi, au moment où mon rêve de bâtir un monde nouveau s'est heurté à la dure réalité, je suis tombé amoureux de la science, qui contient des mondes nouveaux en nombre infini, tous encore à découvrir, et qui m'offrait la possibilité de suivre un chemin libre et lumineux dans l'exploration de ce qui nous entoure. La science a été pour moi un compromis qui me permettait de ne pas renoncer à mon désir de changement et d'aventure, de maintenir ma liberté de penser et d'être qui je suis, tout en minimisant les conflits que cela impliquait avec le monde autour de moi. Au contraire, je faisais quelque chose que le monde appréciait.

Je crois qu'une grande partie du travail intellectuel ou artistique s'enracine dans ce conflit. Il y a là une sorte de refuge pour les déviants potentiels. En même temps, la société a besoin de ce genre de personnes, car elle vit dans un état d'équilibre : d'un côté, des forces assurent sa stabilité et sa permanence, et empêchent le désordre de ruiner ce qui a déjà été construit ; de l'autre, le désir irréprouvable de changement et de justice tend à la modifier petit à petit, à la faire progresser et évoluer. Sans ce désir de changement, la civilisation n'aurait pas grandi et n'aurait pas atteint le point où elle se trouve aujourd'hui ; nous adorerions toujours les pharaons.

Je pense que la curiosité et la soif de changement propres à la

jeunesse, présentes à chaque génération même si parfois moins affirmée, sont la première source d'évolution de la société. À côté des figures d'ordre, qui maintiennent sa stabilité, mais freinent l'histoire, il faut des gens qui vivent de rêves et se lancent dans la découverte de nouveaux mondes, d'idées originales, de façons inattendues de voir et de comprendre la réalité. Notre monde a été pensé et construit par des gens qui, dans le passé, furent capables de rêver. Seuls de nouveaux et nombreux rêves pourront donner naissance à notre futur.

Ce livre rassemble quelques images du chemin parcouru au gré de ma curiosité et de mes rêves, de la fascination des idées et des amis que j'ai rencontrés, ainsi que quelques réflexions sur la valeur et le sens de ce parcours.

Un problème extraordinaire : la gravité quantique

Pendant ma quatrième année à l'université, je suis tombé sur un article écrit par un physicien anglais, Chris Isham, dans lequel il était question de *gravitation quantique*. L'article expliquait qu'à la base de la physique contemporaine se trouve un problème fondamental non résolu, lié à la définition du temps et de l'espace, c'est-à-dire à la structure de base du monde. J'ai lu cet article avec avidité. Je n'y ai pas compris grand-chose, mais le problème que l'article illustre m'a ensorcelé. Ce problème, le voici.

L'état lamentable de la physique fondamentale

La grande révolution scientifique du XX^e siècle se compose de deux épisodes majeurs. D'un côté, il y a la *mécanique quantique*, de l'autre il y a la *relativité générale* d'Einstein. La mécanique quantique, qui décrit très bien les choses microscopiques, a bouleversé profondément ce que nous savons de la matière. La relativité générale, qui explique très bien la force de gravité, a transformé radicalement ce que nous savons du Temps et de l'Espace. Les deux théories sont très bien vérifiées, et sont à la base d'une grande partie de la technologie contemporaine.

Or, ces deux théories mènent à deux manières très différentes de décrire le monde, qui apparaissent incompatibles. Chacune des deux semble écrite comme si l'autre n'existait pas. Ce qu'un professeur de relativité générale explique à longueur de journées en classe est un non-sens pour son collègue qui enseigne la mécanique quantique aux mêmes étudiants dans l'amphi d'à côté, et vice-versa. La mécanique quantique utilise les anciennes notions de temps et d'espace, qui sont contredites par la théorie de la relativité générale. Et la relativité générale utilise les anciennes notions de matière et d'énergie, qui sont contredites par la mécanique quantique.

Par bonheur, il n'y a pas de situation physique courante dans laquelle les deux théories s'appliquent simultanément. Selon l'échelle des phénomènes, c'est soit l'une, soit l'autre. Et les situations physiques dans lesquelles les deux théories s'appliquent, comme les très petites distances, la fin de la vie d'un trou noir ou les premiers moments de la vie de l'Univers, ne sont pas accessibles à nos instruments, pour le

moment. Il n'empêche que tant que nous ne savons pas comment articuler ces deux grandes découvertes, nous n'avons pas de cadre global pour penser le monde. Nous sommes dans une situation de schizophrénie, avec des explications morcelées et intrinsèquement inconsistantes. Au point que nous ne savons plus ce que sont l'Espace, le Temps et la Matière. La physique fondamentale d'aujourd'hui est donc dans un état lamentable.

Cette situation s'est déjà produite dans l'histoire, par exemple avant l'œuvre unificatrice de Newton. Pour Kepler, qui observait les planètes et les étoiles, les objets décrivaient des ellipses. Pour Galilée, qui étudiait les mouvements des objets qui tombent, ces derniers suivaient des paraboles. Mais, ainsi que Copernic venait de le comprendre, la Terre est un endroit comme les autres dans l'Univers. Donc il n'était pas raisonnable d'avoir une théorie qui fonctionne sur la Terre et une autre qui fonctionne dans le ciel.

Newton est parvenu à réconcilier les deux visions dans une seule théorie, et cette très belle unité a prévalu pendant trois siècles. Jusqu'au début du XX^e siècle, la physique a été un ensemble de lois assez cohérent, fondé sur un petit nombre de notions clé comme le Temps, l'Espace, la Causalité et la Matière. Malgré des évolutions importantes, ces notions restaient plutôt stables. Mais vers la fin du XIX^e siècle des tensions internes ont commencé à s'accumuler, et pendant le premier quart du XX^e siècle la mécanique quantique et la relativité générale ont pulvérisé ces fondations. La belle unité newtonienne était perdue.

Les deux théories, mécanique quantique et relativité générale, ont obtenu d'énormes succès et une vérification expérimentale constante ; elles font maintenant partie de nos connaissances établies. Chacune des deux théories modifie la base conceptuelle de la physique classique d'une façon qui est cohérente pour sa part, mais nous ne disposons pas d'un cadre conceptuel capable d'englober *les deux* théories. En conséquence, nous n'avons aucun moyen de prédire ce qui se passe dans le domaine où les deux théories s'appliquent simultanément. Ce domaine est celui des échelles inférieures à 10^{-33} cm^[1]. Des dimensions si petites sont extrêmes, mais *il faut* bien pouvoir les décrire. Le monde ne peut pas être incohérent au point d'être décrit par deux théories incompatibles. De plus, des phénomènes à des échelles si petites se passent dans la Nature près du Big Bang ou bien à la fin de la vie d'un trou noir. Si nous voulons comprendre ces phénomènes, nous devons être capables de calculer ce qui se passe à cette échelle. Il faut, d'une façon ou d'une autre, réconcilier les deux théories. Cette mission est le problème central de la *gravitation quantique*.

De toute évidence, c'est un problème difficile. Mais avec la témérité d'un jeune homme de vingt ans, j'ai décidé, vers la dernière année de mes études universitaires, que c'était le défi auquel je voulais consacrer ma vie professionnelle. J'étais séduit par l'idée d'étudier des concepts aussi fondamentaux que le temps et l'espace, et par le fait même que la situation semblait tellement compliquée.

Presque personne ne travaillait là-dessus en Italie. Mes professeurs, de façon unanime, m'ont vivement déconseillé d'aller dans cette direction. Ils me disaient : « C'est une route qui ne mène nulle part », « Tu ne trouveras jamais de boulot », ou bien : « Tu devrais rejoindre une équipe forte et déjà bien établie ». Mais heureusement, le seul résultat des conseils de prudence dispensés par les adultes est souvent de renforcer le joyeux entêtement de la jeunesse.

Enfant, je lisais les fables d'un écrivain italien pour enfants, Gianni Rodari. L'une d'elle raconte l'histoire de Giovannino et de la route qui ne mène nulle part. Giovannino vivait dans un village où il y avait une route qui, d'après tout le monde, ne menait nulle part. Mais Giovannino était curieux et têtue, malgré tout ce que tout le monde disait, il voulait aller voir. Il y alla, et bien sûr il trouva un château et une princesse, qui le couvrit de pierres précieuses. Quand il rentra au village, ainsi nanti, tout le monde se précipita vers la route, mais personne n'y trouva plus le moindre trésor. Cette histoire m'était restée dans l'esprit. Avec la gravité quantique, j'avais trouvé ma route qui, selon tout le monde, ne mènerait nulle part. Et pourtant, j'y ai trouvé ma princesse et nombre de pierres précieuses scintillantes.

Espace, particules et champs

Je vais tâcher de décrire l'origine et la difficulté du problème de la gravité quantique un peu plus en détail, en commençant par une notion clé : celle d'espace.

La notion d'espace à la base de la vision du monde qui nous est la plus familière est celle d'un grand « conteneur » du monde. Une espèce de grande boîte, d'étagère, régulière, plate, sans aucune direction privilégiée, dans laquelle se déroulent les événements du monde. Tous les objets que nous connaissons se trouvent dans cette espace-boîte, et s'y déplacent. Telle est la vision du monde développée et utilisée par Newton : un espace-boîte dans lequel se déplacent des particules solides. C'est sur la base de cette simple image que Newton a construit sa puissante théorie, qui est encore aujourd'hui à la base d'innombrables applications dans tous les domaines de la technologie et de l'ingénierie.

Deux cents ans après Newton, à la fin du XIX^e siècle, James Clerk

Maxwell et Michael Faraday étudient la force électrique entre des objets chargés, et cela les conduit à une petite modification de cette vision du monde : ils y ajoutent un troisième ingrédient. Ce nouvel ingrédient est le « champ » électromagnétique, un nouvel « objet », qui aura une grande importance dans toute la physique qui va suivre.

Le champ électromagnétique est le porteur des forces électrique et magnétique. Un champ est une sorte d'entité diffuse qui remplit tout l'espace. Faraday l'imagine comme un ensemble de *lignes* issues des charges électriques positives et aboutissant aux charges électriques négatives. Ces lignes occupent tout l'espace. Dans la figure 1, on a tracé quelques-unes de ces lignes, mais en réalité elles sont en nombre infini et remplissent tout l'espace de façon continue.

En chaque point de l'espace il passe une ligne de Faraday. La direction de cette ligne, en ce point, est donnée par un vecteur (une petite flèche), tangent à la ligne. Le champ exerce une force électrique sur une charge électrique placée à cet endroit, dans la direction de ce vecteur.

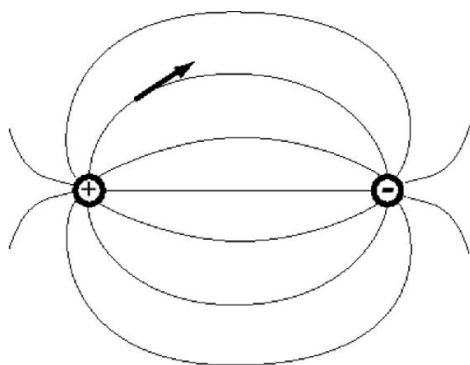


Fig. 2.1 Le champ électrique autour de deux charges ; le champ est composé de lignes, les lignes de Faraday. La direction du champ en un point est indiquée par la flèche.

La grande découverte de Faraday et de Maxwell est de comprendre que ce champ est une entité autonome qui existe indépendamment des charges électriques. En l'absence de charges, les « lignes de Faraday » existent aussi. S'il n'y a pas de charges auxquelles les lignes peuvent aboutir, les lignes se referment sur elles-mêmes, et forment donc des courbes fermées dans l'espace, appelées *boucles*. L'une de ces lignes de Faraday est représentée dans la figure 2.

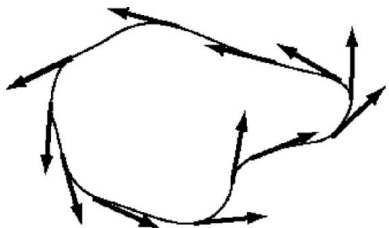


Fig. 2.2 Une ligne de Faraday fermée, c'est-à-dire une boucle. Les flèches représentent le champ électrique qui en chaque endroit est tangent à la ligne de Faraday. Ces lignes remplissent tout l'espace et constituent le champ électromagnétique.

Faraday était un expérimentateur de génie et surtout un très grand visionnaire ; mais il manquait complètement de technique mathématique. Maxwell a su traduire les intuitions de Faraday en formules mathématiques et il en a tiré toutes les conséquences. Les équations de Maxwell décrivent le champ électromagnétique envisagé par Faraday, et donc les lignes de Faraday. Le champ électrique de Maxwell en un point, par exemple, est justement la petite flèche tangente à la ligne de Faraday qui passe par ce point.

Le champ se comporte comme une mer de lignes mouvantes. Chaque mouvement se propage de proche en proche. La forme de chaque ligne n'est ni fixe ni arbitraire, mais gouvernée par les équations de Maxwell. Les lignes bougent continuellement, comme les vagues de la mer. Elles se déforment sous l'action des lignes voisines et des charges électriques. Lorsqu'il y a des charges, celles-ci ouvrent les boucles et donnent au champ électromagnétique l'aspect illustré dans la figure 1.

Un coup de génie de Maxwell est d'avoir compris que la lumière n'est rien d'autre qu'un des mouvements ondulatoires rapides des lignes de champ. On dit souvent que les champs sont « invisibles », alors qu'en réalité nous ne « voyons » *que* le champ ! Nous voyons *la lumière* réfléchiée par les objets, et non pas les objets eux-mêmes directement.

Il existe une grande variété d'ondes électromagnétiques, ayant différentes longueurs d'onde. Hertz, le premier, a utilisé les ondes radio, qui oscillent plus lentement que celles de lumière, pour envoyer des informations à distance. De là, des centaines d'autres applications ont peu à peu enrichi notre technologie moderne, et changé la face du monde.

Au total, les travaux de Faraday et de Maxwell ont modifié la vision du monde laissée par Newton, mais pas fondamentalement. On imagine toujours qu'il y a un espace-boîte et que les choses bougent dans cet espace. Simplement, en plus de l'espace-boîte et des particules, il y a maintenant aussi le champ électromagnétique. Une

troisième entité s'est ajoutée aux deux autres.

La relativité générale

Une vraie révolution dans notre compréhension de l'Espace a lieu en 1915, avec Einstein. Einstein est fasciné par les travaux de Maxwell. Il cherche pour sa part à expliquer la force gravitationnelle (cette force qui nous tire vers le sol, qui maintient la Terre dans le voisinage du Soleil, et la Lune dans le voisinage de la Terre). Il comprend qu'il faut introduire un *champ gravitationnel*, similaire au champ électromagnétique. De la même façon que la force électrique entre des charges est portée par le champ électromagnétique qui occupe l'espace entre elles, la force gravitationnelle entre deux masses doit être portée par un champ gravitationnel. Il doit donc y avoir aussi des « lignes de Faraday » gravitationnelles qui relient les masses entre elles, formant un champ gravitationnel qui occupe tout l'espace, et qui peuvent bouger, vibrer, faire des vagues. On peut donc penser qu'en plus des lignes de Faraday du champ électromagnétique, il y a aussi, dans l'espace, des lignes de Faraday du champ gravitationnel. Einstein introduit le champ gravitationnel, et écrit ses équations — appelées aujourd'hui les équations d'Einstein — sur le modèle des équations de Maxwell.

S'il avait simplement introduit le champ gravitationnel, et écrit ses équations, Einstein aurait été un grand scientifique, mais pas un génie. Sa découverte alla beaucoup plus loin. En cherchant à comprendre la forme et les équations qui décrivent ce champ, Einstein fait une découverte étonnante : il comprend que le champ gravitationnel et l'espace-boîte de Newton sont en réalité *une seule et même chose*. Voilà probablement la plus grande découverte d'Einstein.

Si vous découvrez que Monsieur A et Monsieur B sont en réalité la même personne, il y a deux façons de voir la chose : vous pouvez dire qu'il n'y a pas de Monsieur B, car en réalité c'était Monsieur A ; ou bien vous pouvez également dire qu'il n'y a pas de Monsieur A, car en réalité c'était Monsieur B. Ainsi, la découverte d'Einstein peut s'énoncer de deux façons. La première : il n'y a pas de champ gravitationnel et c'est l'espace lui-même qui bouge et vibre et se déforme comme les vagues de la mer. C'est une façon fréquente de présenter les choses, mais elle est problématique car elle conduit à penser que l'espace serait quelque chose qui a une essence totalement différente du champ électromagnétique. Or, le champ électromagnétique et le champ gravitationnel ne sont pas d'un genre si différent. Donc, la meilleure façon de décrire la grande découverte d'Einstein est de dire que l'espace de Newton n'existe pas : c'est en réalité le champ gravitationnel. Newton avait pris le champ

gravitationnel pour une entité spéciale, un espace absolu, qui en fait n'existe pas.

C'est une découverte inattendue et spectaculaire. L'espace, que Newton avait décrit comme une boîte fixe et rigide, en réalité n'existe pas. Ce qui existe, c'est le champ gravitationnel : un objet physique élastique et dynamique, du même genre que le champ électromagnétique.

Du coup, le monde n'est plus fait de particules et de champs qui vivent dans l'espace, mais uniquement de particules et de champs. De champs qui vivent pour ainsi dire l'un dans l'autre. Nous vivons sur le champ gravitationnel, ou dans le champ gravitationnel, mais pas dans un espace-boîte rigide.

Imaginez une île dans l'océan. Beaucoup d'animaux y vivent ; nous dirons que nous voyons des « animaux sur une île ». Mais un jeune biologiste marin nommé Einstanium mène une enquête serrée et découvre que l'île n'est pas une île : en réalité c'est une énorme baleine. Donc, les animaux ne vivent pas sur une île, mais sur un autre animal. On ne peut plus parler d'« animaux sur une île », mais d'« animaux sur un animal ». La découverte que l'île est en fait une baleine nous révèle qu'il s'agit d'un animal comme les autres et donc qu'il n'existe pas *deux entités* de nature différente, des animaux et des îles, mais seulement des entités de la même nature, des animaux, qui vivent « empilés l'un sur l'autre », et sans faire appel à aucune terre émergée.

De la même façon, Einstein a compris que les champs n'ont pas besoin de vivre dans un espace-boîte fixe, car ils peuvent vivre « empilés les uns sur les autres ». Le monde de Newton était comme l'île qui abrite des animaux, c'est-à-dire constitué d'une base fixe, statique, immobile. Einstein a établi qu'en fait Newton s'est trompé : l'espace n'est pas quelque chose de très différent des champs et des particules qui s'y déplacent. Au contraire, il est lui-même un champ comme les autres. Il peut bouger, onduler et se courber, et son comportement est régi par des équations (les équations d'Einstein), exactement comme le champ électromagnétique.

Bien sûr, les modifications du champ gravitationnel sont tellement faibles, à notre échelle, que l'espace nous paraît parfaitement homogène et lisse, tout comme le dos de la baleine dans l'île aux animaux. Sa structure échappe à nos perceptions de la même façon que les aspérités d'une feuille de papier échappent à nos doigts. Mais avec des instruments assez précis nous verrions les « ondulations » de l'espace-temps. Bref, il n'y a pas de « champs dans l'espace », mais des « champs sur des champs ».

Telle est la théorie d'Einstein dénommée *théorie de la relativité générale*. Il s'agit de « relativité » parce qu'il n'est plus possible de donner une

localisation des objets dans l'espace, mais seulement une localisation relative de ceux-ci les uns par rapport aux autres, c'est-à-dire « relativement » aux autres. Et il s'agit de relativité « générale » car, bien que la théorie ait vu le jour en tant que théorie de la force de gravité, son importance est « générale » dans la mesure où elle modifie la notion d'espace et donc change notre compréhension du monde physique dans sa globalité.

Cette théorie est très belle, mais peu accessible. Des mathématiques compliquées sont nécessaires à sa formulation exacte (il faut des mathématiques qui décrivent des champs vivant sur d'autres champs et non dans un espace-boîte). Mais quand on la comprend bien, on ne peut qu'être fasciné par sa simplicité et sa clarté conceptuelle. Des concepts au départ complètement déconnectés – l'espace, la force de gravité, les champs – deviennent autant d'aspects d'une seule entité simple : le champ gravitationnel.

Comment Einstein a-t-il trouvé cette théorie ? Je voudrais dissiper l'idée répandue que l'expérience a joué un faible rôle dans le travail d'Einstein, et que ses découvertes sont le résultat de la pensée pure. La relativité générale semble une création pure du génie d'Einstein : en raisonnant sur la nature de l'espace, le génie comprend que l'espace est courbe, calcule le déplacement apparent des étoiles durant une éclipse, et voilà, il a raison. Ce n'est pas ainsi que les choses se sont passées. Einstein n'a pas créé ses théories à partir de rien. Sa façon de travailler était de prendre très au sérieux les théories établies à son époque et de se focaliser sur les contradictions apparentes entre ces théories bien établies, à savoir entre la théorie de Maxwell et la mécanique de Galilée-Newton, pour sa découverte de la relativité restreinte en 1905 (dont je parlerai plus en détail dans le chapitre 6) ; et entre la théorie de la gravité de Newton et la relativité restreinte pour la relativité générale de 1915. Einstein utilise ces théories comme base pour trouver une conceptualisation nouvelle qui les englobe. Les théories existantes jouent, pour Einstein, le rôle de données d'expérience qu'il s'attache à structurer, tout comme les théories de Kepler et de Galilée ont constitué le matériau de base pour Newton. Loin d'être des spéculations pures, les découvertes d'Einstein, comme celles de Newton, sont très fortement ancrées dans l'empirisme, même si les données d'expérience sont déjà structurées en théories préexistantes.

Il y a vingt ans encore, la relativité générale était considérée comme une théorie très belle mais exotique, connaissant peu d'applications et peu de confirmations expérimentales. Depuis lors, cependant, on a assisté à une explosion des confirmations expérimentales et des applications de la relativité générale. Les applications se trouvent dans les domaines les plus divers : de l'astrophysique à la cosmologie et aux

expériences qui mettent en évidence les ondes gravitationnelles (les vibrations des lignes de Faraday gravitationnelles, prédites par la théorie).

Parmi les nombreuses prédictions de la théorie maintenant confirmées de façon spectaculaire, je mentionnerai seulement l'existence des trous noirs qui ont récemment été assez bien identifiés dans l'univers. Et parmi les applications, le GPS (le Système de Positionnement Global, en anglais *Global Positioning System*) que chacun connaît aujourd'hui. Ce petit appareil, qu'on trouve dans les magasins de sport ou dans l'équipement des voitures et qui fournit votre positionnement exact sur la planète, ne pourrait pas fonctionner sans prendre en compte la relativité générale.

Mais cette révolution Einsteinienne n'est pas la seule qui a bouleversé la physique du XX^e siècle. L'autre grande révolution est la mécanique quantique. Elle a changé notre façon de penser les objets et la matière, qui elle aussi s'enracinait dans la théorie de Newton.

La mécanique quantique

La notion d'objet avait déjà changé un peu avec Faraday et Maxwell. Le monde n'était plus seulement constitué de particules, c'est-à-dire de minuscules « cailloux » solides, mais aussi de champs, impalpables et diffus. Mais la révolution de la notion d'objet qui survient avec la mécanique quantique est beaucoup plus radicale. Grâce à un long travail de recherche expérimentale sur les atomes, les radiations, la lumière et autres, et à une lutte théorique quasiment épique (dont les héros sont nombreux : Max Planck, Albert Einstein – encore lui ! –, Niels Bohr, Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Paul Dirac...), on découvre que la vision Newtonienne de la matière ne s'applique pas du tout aux objets microscopiques. Il faut la remplacer par une « mécanique quantique ».

La mécanique quantique nous apprend essentiellement deux choses. Tout d'abord, on découvre qu'à petite échelle il y a toujours une certaine « granularité ». Par exemple un objet du monde microscopique qui se déplace dans un espace limité ne peut pas avoir une vitesse quelconque ; il ne peut avoir que certaines vitesses particulières – on dit que sa vitesse est « quantifiée ». Beaucoup de grandeurs physiques ont cette structure granulaire, quantifiée. L'énergie d'un atome, par exemple, dont on pourrait aussi penser qu'elle peut prendre n'importe quelle valeur, ne peut en réalité avoir que certaines valeurs (les « niveaux d'énergie » de l'atome), que l'on peut calculer à partir de la théorie. Tout se passe comme si cette énergie était granulaire : il y a des petits paquets d'énergie, ou des

« quanta » d'énergie. De même pour les champs. Le champ électromagnétique, cet ensemble de lignes mouvantes dont nous avons parlé, lorsqu'on l'observe à très petite échelle, est fait de *grains* ou de « quanta » qu'on appelle des photons.

L'autre nouveauté de la mécanique quantique est que dans le mouvement de toute chose il y a une composante de hasard. Il y a une indétermination intrinsèque dans le mouvement. L'état présent d'une particule ne détermine pas exactement ce qui va se produire ensuite, comme Newton l'avait supposé. La façon dont les choses bougent, à l'échelle microscopique, est régie par des lois probabilistes : on peut calculer très précisément la *probabilité* que quelque chose arrive (le nombre de fois où cela arrivera si nous répétons l'expérience un grand nombre de fois), mais non pas prédire le futur avec certitude. La dynamique n'est donc plus déterministe mais probabiliste. Dès lors, une particule ne peut plus être décrite par sa position, mais plutôt par un « nuage » de probabilités qui représente les probabilités de chaque position dans laquelle la particule pourrait se trouver : là où le nuage est plus dense, il est plus probable de trouver la particule. À toute particule ou photon est donc désormais associé ce nuage de probabilités. On ne décrit plus le mouvement d'une particule, mais « l'évolution dans le temps de la probabilité de présence de la particule ».

Le déterminisme et le continu, deux structures de base de la pensée classique sur la matière, sont désormais caducs. Quand on regarde le monde de très près, il est discontinu et probabiliste.

Voilà ce que nous ont appris les deux grandes révolutions conceptuelles du début du XX^e siècle, qui, je le rappelle, ont été vérifiées de façon extrêmement précise et qui sont à la base de toute notre technologie actuelle.

Gravité quantique

Enfin, nous arrivons au cœur du problème de la gravité quantique. Que se passe-t-il si on essaie de combiner ce que nous avons appris avec la mécanique quantique et ce que nous avons appris avec la relativité générale ?

D'une part, Einstein a découvert que l'Espace est un champ, comme le champ électromagnétique. D'autre part, la mécanique quantique nous apprend que tout champ est formé de quanta, et qu'on ne peut décrire que le « nuage de probabilité » de ces quanta. Si l'on met ensemble ces deux idées, il s'ensuit immédiatement que l'Espace, c'est-à-dire le champ gravitationnel, doit lui aussi présenter une structure granulaire, exactement comme le champ électromagnétique. Il doit donc y avoir

des « grains d'espace ». De plus, la dynamique de ces grains doit être probabiliste. Donc, l'espace doit être décrit comme un « nuage de probabilités de grains d'espace »... C'est une conception qui donne un peu le vertige, tant elle est éloignée de notre intuition usuelle, mais c'est pourtant cette vision qui découle de nos meilleures théories. L'espace-boîte fixe de Newton n'existe plus. L'espace est un champ qui ondule et fait des vagues, et sa structure est faite de grains obéissant à des lois probabilistes.

Mais qu'est-ce que cela peut signifier, des « grains d'espace » ? Comment les décrire ? Par quelles mathématiques ? Quelles sont les équations qui les gouvernent ? Que signifie l'expression « nuages de probabilités de grains d'espace » ? Quelles conséquences cela aura-t-il sur ce que nous observons et mesurons ? Voilà tout le problème de la gravitation quantique : construire une théorie mathématique décrivant ces nuages de probabilités de grains d'espace, et comprendre ce qu'ils signifient.

Mais le problème ne s'arrête pas encore là. En 1905, dix ans avant la découverte de la relativité générale, Einstein a également découvert que l'espace et le temps ne peuvent être décrits qu'ensemble : ils sont strictement liés l'un à l'autre et forment un tout indissociable, l'*espace-temps*. Donc, quand j'ai dit que la notion d'espace devait être remplacée par le champ gravitationnel, ce n'était pas précis : c'est en fait la notion d'espace-temps qui doit être remplacée par celle de champ gravitationnel. Et donc c'est l'espace-temps qui doit devenir granulaire et probabiliste, pas seulement l'espace. Mais qu'est-ce qu'un temps probabiliste ?

Pour arriver là, nous devons construire un schéma conceptuel qui n'a plus rien à voir avec notre conception usuelle de l'espace et du temps. Il faut penser un monde dans lequel le temps n'est plus une variable continue qui s'écoule, mais devient quelque chose d'autre, fondé sur ce nuage de probabilités de grains d'espace-temps.

Tel est cet extraordinaire problème non résolu dont j'ai découvert l'existence durant ma quatrième année d'université.

Tandis que j'écrivais avec mes amis mon livre sur la révolution étudiante (livre que la police n'a pas aimé et qui m'a valu un passage à tabac dans le commissariat de police de Vérone : « Dis-nous les noms de tes amis communistes ! »), je m'immergeais de plus en plus dans l'étude de l'espace et du temps, essayant de comprendre les solutions au problème qui avaient été proposées jusque-là.

J'ai réussi, non sans mal, à entrer dans un programme de doctorat à Padoue, et j'ai choisi comme directeur un professeur qui ne s'occupait pas trop de moi, mais m'autorisait à continuer dans la voie que je voulais suivre. J'ai consacré mes années de thèse à étudier de façon

systematique tout ce qui était connu sur le problème de la gravitation quantique et toutes les tentatives existant à l'époque pour résoudre le problème. Les autres doctorants publiaient déjà leurs premiers articles, tandis que je traversais mes trois premières années de thèse sans produire une seule publication. Ce qui m'intéressait, ce n'était pas la carrière : c'était d'étudier, de comprendre.

À cette époque, il y avait peu d'idées pour résoudre ce problème, et elles n'étaient qu'embryonnaires. La voie qui semblait la plus prometteuse était liée à une équation, appelée équation de Wheeler-DeWitt. Cette équation était, en principe, « l'équation quantique complète du champ gravitationnel ». C'est l'équation qu'on obtient si on combine, tout simplement, les équations d'Einstein de la relativité générale avec celles de la mécanique quantique. Mais l'équation de Wheeler-DeWitt présentait toutes sortes de difficultés : elle était mal définie d'un point de vue mathématique, sa signification physique restait des plus obscures et elle ne permettait même pas de calculer grand-chose. La situation que j'ai découverte pendant mes années de thèse était donc très confuse.

Un quart de siècle plus tard, les choses ont beaucoup changé. On connaît aujourd'hui des solutions possibles au problème de la gravitation quantique, même si aucune de ces solutions n'est complète et que nous ne savons pas encore laquelle est la bonne.

Ma grande chance et mon grand bonheur ont été de participer à la construction de l'une de ces solutions : la *loop quantum gravity*, ou « théorie des boucles ».

Notes

[1] En notation scientifique, 1 000 s'écrit 10^3 , un million 10^6 , un milliard 10^9 etc. Le signe moins indique l'inverse, soit 10^{-3} pour un millièème, 10^{-6} pour un millionième, etc. 10^{-33} cm représente donc un centimètre divisé par 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000.

La théorie des boucles

Pendant ma thèse, je me suis remis à voyager comme avant, à la recherche de nouvelles idées et de nouveaux amis, mais avec un objectif beaucoup plus précis cette fois : rencontrer des gens intéressés par la gravitation quantique et les problèmes du temps et de l'espace. Je suis parti rendre visite aux plus grandes figures mondiales de la gravitation quantique, avec des budgets provenant de différentes sources : les fonds accordés par la loi italienne aux doctorants pour partir étudier à l'étranger, une bourse d'étude allouée par une fondation privée, dont j'ai appris l'existence incidemment par une note affichée au Département de Physique à Trente, ou encore mes propres économies. J'annonçais ma visite par lettre (le courrier électronique n'existait pas encore) et je partais.

Londres et Syracuse

La première personne que j'ai voulu voir est Chris Isham, l'auteur de l'article qui avait suscité mon enthousiasme sur le sujet. Je suis resté deux mois avec lui à l'Imperial College de Londres. Là, j'ai rencontré pour la première fois le monde coloré et international des chercheurs de physique théorique : des jeunes en costume cravate se mêlaient avec le plus grand naturel à des chercheurs aux pieds nus et aux longs cheveux sortant de bandeaux colorés ; toutes les langues et toutes les physionomies du monde se croisaient, et l'on y percevait une espèce de joie de la différence, dans le partage d'un même respect de l'intelligence. J'y retrouvais beaucoup de l'esprit libre et joyeux des communautés hippies que j'avais rencontrées, et aimées, dans mes voyages d'une époque précédente.

Chris était le gourou de la gravité quantique. Il connaissait tout ce qu'on pouvait connaître sur le problème. Il connaissait aussi la psychanalyse jungienne, la théologie, et toutes sortes d'autres sujets, qui se mélangeaient naturellement dans son discours. Il avait un naturel gentil et doux, moitié grand sage capable de donner le conseil juste à chacun, et moitié éternel jeune homme toujours émerveillé par le mystère du monde. Je lui ai exposé mes premières idées, très floues, et je l'ai écouté. Il m'a fait voir, gentiment, les erreurs et l'imprécision de mes considérations. Je méditais sur ses paroles durant de longues promenades à proximité de l'Imperial College, dans les jardins de

Kensington. Ce sont des jardins magiques où rôde Peter Pan, le garçon qui ne voulait pas grandir... J'ai photocopié tout ce qui existait sur le sujet au College, et j'ai lu énormément.

Un jour, Chris m'a dit qu'aux États-Unis un jeune chercheur indien nommé Abhay Ashtekar avait réussi à réécrire la théorie de la relativité générale d'Einstein sous une forme légèrement différente, qui pourrait bien simplifier le problème. Selon Chris, il serait probablement plus aisé d'approcher la gravitation quantique en partant de la nouvelle formulation d'Ashtekar.

Je suis donc parti aux États-Unis pour rencontrer Abhay Ashtekar. Il travaillait à l'Université de Syracuse. C'était Syracuse aux États-Unis, pas en Sicile, mais quand même, l'idée d'aller dans une ville du même nom que celle où avait vécu l'un des plus grands scientifiques de tous les temps, Archimède, me paraissait de bonne augure.

Je suis resté là deux mois pour étudier cette nouvelle formulation qui n'était pas encore publiée. Abhay était rayonnant d'énergie, il avait déjà un petit groupe autour de lui, qu'il dirigeait avec le charme de sa personnalité méticuleuse et courageuse en même temps. Il réunissait ses collaborateurs dans une salle et remplissait les tableaux noirs d'une écriture fine et précise, pour faire, mille fois de suite, « le point de la situation », énumérer et débattre des questions ouvertes. Sa façon de penser était analytique : il n'arrêtait pas de revenir sur le raisonnement déjà fait, de le corriger, de le réviser, jusqu'au moment où une faille commençait à émerger – et où une autre direction possible, restée cachée, se dévoilait. Il n'acceptait pas d'erreur, de zone d'ombre, dans sa propre pensée. Il semblait représenter une sorte d'équilibre magique entre Orient et Occident, l'une de ces formes d'intelligence nouvelle qui naissent quand des civilisations différentes ont le courage de se mêler. Je participais à ces réunions, avide d'apprendre.

Parallèlement, je rédigeais mes premiers articles de physique, et je me rendais, sans invitation ni soutien financier, dans les colloques où le sujet était débattu. Dans l'un de ces colloques, à Santa Barbara en Californie, j'ai appris l'existence d'un autre jeune chercheur, américain, nommé Lee Smolin. Il utilisait la nouvelle formulation de la relativité générale trouvée par Ashtekar et, en travaillant avec son ami Ted Jacobson, il était parvenu à trouver d'étranges solutions à l'équation de Wheeler-DeWitt. Je suis donc allé voir Smolin à l'université de Yale pour savoir à quoi ressemblaient ces solutions, et c'est ainsi qu'une grande amitié est née.

La veille de mon départ de Syracuse pour Yale, ma fiancée m'a téléphoné d'Italie pour me signifier la fin de notre histoire. Je me suis senti précipité dans le plus noir désespoir. Mon humeur était si sombre que je voulais annuler mon départ. Mais il était trop tard pour me désister, et je suis parti quand même. Quand je suis arrivé chez Smolin, assez intimidé, j'ai commencé à lui parler de mes études puis, brusquement, mon amour anéanti m'est revenu à l'esprit, et les larmes me sont montées aux yeux. Lee était stupéfait. Mais quand j'ai expliqué – en le priant de m'excuser – les raisons de mon comportement bizarre, il a commencé à me parler de sa fiancée récemment perdue... Nous avons laissé la physique de côté et nous avons passé l'après-midi à naviguer sur un petit bateau à voile, parlant de nos vies et de nos rêves.

Le lendemain, Lee a commencé à me parler des difficultés qu'il rencontrait à essayer de comprendre les nouvelles solutions de l'équation de Wheeler-DeWitt qu'il avait trouvée avec Ted Jacobson. La façon de penser de Lee était à l'opposé de celle d'Ashtekar : Lee ne regardait qu'en avant, il cherchait à voir à travers l'obscurité de tout ce que nous ne savions pas, à deviner ce qu'il pouvait y avoir derrière l'écran de notre ignorance. Il n'avait aucune crainte de dire des bêtises : il pensait qu'une seule intuition qui marche vaut bien mille suggestions à jeter. Lee est un visionnaire, de l'espèce d'un Giordano Bruno, qui, le premier, a parlé d'un espace infini rempli d'une infinité de mondes, ou d'un Kepler, qui le premier a libéré les planètes des sphères cristallines des ciels, et les a laissées libres de suivre de pures trajectoires mathématiques dans l'espace – des hommes qui ont su rêver de nouvelles façons de concevoir le monde.

L'étrangeté des solutions trouvées par Lee et Ted tenait au fait que chacune d'elle était associée à une courbe fermée dans l'espace, un anneau, une *boucle*. Que signifiaient ces *boucles* ? Durant les longues discussions nocturnes sur le campus de Yale, alors que nous remâchions inlassablement le problème, une solution nous est apparue : ces *boucles* constituent les lignes de Faraday du champ gravitationnel quantique. On avait des lignes individuelles au lieu de l'ensemble continu de lignes du champ classique, parce qu'il s'agissait ici de la théorie quantique : dans la théorie quantique, le champ gravitationnel se brise en lignes de champs séparées les unes des autres, comme le champ électromagnétique se brise en photons.

Mais, puisque le champ gravitationnel est l'espace, nous ne pouvons pas dire que ces *boucles* sont immergées dans l'espace : elles *sont* l'espace elles-mêmes ! L'espace est constitué de ces *boucles*. Voilà ce que les équations nous disaient. Ainsi, c'est lors de ces conversations qu'est née l'idée qui devait déboucher sur ce qu'on appelle aujourd'hui la gravitation quantique à *boucles*.

Pendant plusieurs semaines, nous avons travaillé frénétiquement à réécrire entièrement la théorie de Wheeler-DeWitt en termes de *boucles*. Nous avons ainsi réussi à obtenir une nouvelle version de l'équation de Wheeler-DeWitt beaucoup mieux définie que l'équation originale, et nous y avons trouvé de nombreuses solutions tout en commençant à comprendre leur signification.

La solution déterminée par une seule *boucle* représente, grosso modo, un univers consistant seulement en un mince « filament d'espace » et rien d'autre. L'existence de ces univers constitués d'une seule *boucle* était le premier indice concret de la nature granulaire, ou quantique, de l'espace. Pour représenter notre monde, il suffisait de superposer un grand nombre de solutions constituées d'une seule *boucle* chacune. On obtenait ainsi un « tissu » formé d'un nombre fini de *boucles*. Contrairement au champ classique, où les lignes de Faraday sont en nombre infini, on peut compter le nombre de *boucles* dans le champ gravitationnel quantique. L'espace est tissé de ces objets à une dimension, les *boucles*, dont les mailles s'enchaînent dans les trois dimensions pour former un tissu 3D. Et de la même façon qu'un T-shirt paraît lisse de loin, tandis qu'avec une loupe on peut en compter les fils, l'espace paraît continu pour nous, alors qu'à très petite échelle, on peut en compter les *boucles*.

En l'absence de masses, les *boucles* restent fermées sur elles-mêmes. Au voisinage d'une masse, les boucles s'ouvrent, tout comme les boucles du champ électromagnétique s'ouvrent sous l'action de charges. Bien sûr, il ne s'agit pas ici de masses au sens macroscopique. Les boucles du champ gravitationnel ont une taille de l'ordre de 10^{-33} cm (l'échelle de Planck), c'est-à-dire qu'elles sont des milliards de fois plus petites que les noyaux des atomes eux-mêmes. Le « tissu » formé par les boucles est beaucoup plus serré que les assemblages d'atomes qui « vivent » dessus. On pourrait voir ceux-ci comme des grosses perles brodées sur le fin tissu d'une chemise. C'est donc au niveau des particules élémentaires et de l'échelle de Planck que se produisent les interactions élémentaires entre masses et boucles. Un électron aura pour effet d'ouvrir les boucles de son voisinage. L'électron, ou toute autre particule à l'échelle de Planck, se trouve ainsi être l'extrémité d'un certain nombre de lignes du champ gravitationnel.

On pourrait dire que cette théorie réussit à quantifier l'espace, que celui-ci est devenu granulaire. Je préfère dire qu'il n'y a plus d'espace. Il n'y a que des particules, des champs et des *boucles* de champ gravitationnel, le tout en interaction.

La figure 3 présente un modèle schématique de la structure fine de l'espace : un enchevêtrement de *boucles*. J'ai construit un modèle destiné à illustrer l'idée, à cette époque, en faisant le tour des

serruriers de Vérone pour acheter tous les anneaux de porte-clés que je pouvais trouver.

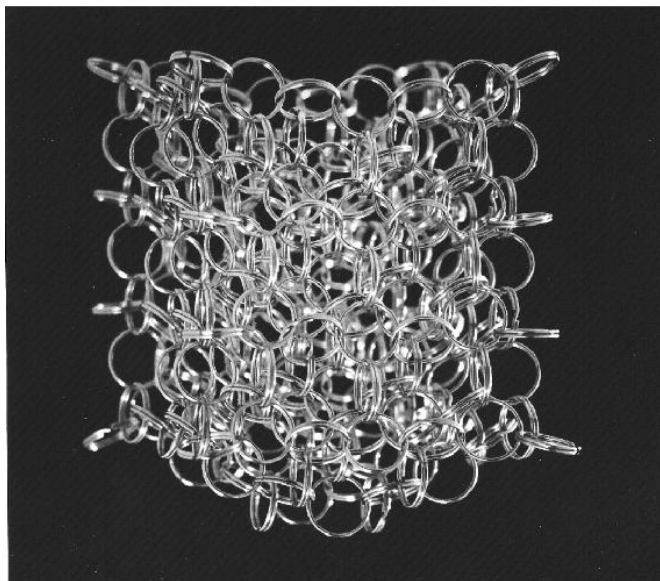


Fig. 3.1 La première image de l'espace suggérée par la théorie des boucles. À l'échelle la plus petite, l'espace est un ensemble de petits anneaux.



Fig. 3.2 Moi-même, jeune, en train de monter les anneaux.

Ce fut bien sûr une époque merveilleusement excitante. Dans les semaines suivantes, nous nous sommes rendus à Syracuse, voir Ashtekar, puis à Londres, voir Chris Isham, puis dans un grand colloque de physique à Goa, en Inde, où nous avons annoncé nos résultats publiquement pour la première fois. La naissance « officielle » de la théorie des boucles peut ainsi être datée de ce colloque en 1987. Nos résultats ont bientôt attiré l'attention et nous

avons commencé à récolter des réactions positives de la part de la communauté scientifique.

Honnêteté intellectuelle

Le travail réalisé avec Lee Smolin à Yale a transformé ma vie, comme il a transformé la sienne. L'article que nous avons publié ensemble est toujours l'un des articles les plus cités en gravité quantique et il est à la source de nos carrières respectives dans les institutions scientifiques. L'amitié qui m'attache à Lee depuis lors ne s'est jamais démentie, et s'est nourrie de cette belle collaboration inaugurale, en particulier d'un épisode inoubliable, qui m'a beaucoup marqué, et qui explique mon respect immense pour Lee.

Le jour où nous avons décidé que nos résultats étaient assez développés pour écrire un article, Lee est venu me voir dans mon studio à Yale, l'air sérieux. Nous étions tous les deux conscients que nos résultats étaient significatifs. Lee m'a rappelé qu'au début de notre travail commun, l'un des premiers jours de mon séjour à Yale, c'était moi qui étais arrivé dans son studio avec un premier brouillon de l'idée d'une représentation de la gravité quantique sous forme de boucles, et il me proposa d'écrire d'abord moi-même un premier article court, afin de pouvoir garder la paternité de l'idée, après quoi nous ferions un article à deux, présentant tous les développements élaborés ensemble.

Sa proposition m'a semblé absurde : mon idée initiale était complètement vague, et sans sa contribution elle serait restée une hypothèse fumeuse et sans valeur ; mais Lee s'inquiétait pour moi, un peu plus jeune que lui, encore sans poste et totalement inconnu dans le monde scientifique. Il ne voulait pas me priver de la reconnaissance de ma contribution. Évidemment, j'ai refusé, et je m'en félicite : il aurait été totalement injuste de retirer son nom de la première annonce de *notre* idée. Mais cette offre généreuse de Lee a eu sur moi un effet énorme, non seulement sur notre amitié, mais aussi sur ma façon de concevoir la science.

Le monde de la science, comme j'ai pu le découvrir ensuite avec tristesse, y compris à mes dépens, n'a rien à voir avec un conte de fée. Les cas de vol d'idées d'autrui sont permanents. Beaucoup de chercheurs sont extrêmement soucieux d'arriver à être les premiers à formuler des idées, quitte à les souffler aux autres avant que ceux-ci ne parviennent à les publier, ou à réécrire l'histoire de manière à s'attribuer les étapes les plus importantes. Cela génère un climat de méfiance et de suspicion qui rend la vie amère et entrave gravement les progrès de la recherche. J'en connais beaucoup qui refuseront de

parler à qui que ce soit des idées sur lesquelles ils sont en train de travailler avant de les avoir publiées.

En une minute, Lee Smolin m'a montré que tout cela est inutile. Il m'a offert son intégrité scientifique absolue, au point de frôler l'excès. Il m'a montré qu'il y a une façon bien plus belle de faire de la science, dans laquelle ce qui compte, c'est d'abord de découvrir et d'explorer ensemble, et ensuite de se montrer parfaitement honnête et généreux dans le partage des mérites, si jamais l'on trouve quelque chose.

C'est une leçon qui m'a profondément marqué, et que j'ai essayé de suivre toute ma vie. Je parle librement de mes idées à qui veut les entendre, sans rien cacher, et j'essaie de convaincre mes étudiants d'en faire autant, même si ce n'est pas toujours entendu. Ce qui n'empêche pas que des accidents se produisent, évidemment. Comme tous ceux qui sont impliqués dans la science, j'ai souffert que des idées me soient soustraites, volontairement ou même involontairement. Cela s'est passé de même avec Lee. Et j'ai moi aussi été accusé d'avoir publié des résultats qui s'inspiraient de quelque conversation avec d'autres. Dans un monde où les idées s'échangent continuellement, il est facile de perdre la trace des sources, et de prendre pour une idée à soi quelque chose qu'on a entendu et transformé légèrement. Mais presque toujours, un appel téléphonique permettra de préciser : « Tu ne te souviens pas que c'est moi qui t'en avais parlé ? » « Oh, si, c'est vrai, c'est un accident, je suis désolé, je vais corriger ça ». Et la sérénité revient. Toutefois, je connais plus d'un collègue avec qui un coup de fil ne suffira pas... Hé bien ! le monde n'est pas parfait et il faut vivre avec les choses comme elles sont. Mais toute ma vie j'ai essayé de vivre à la hauteur de la leçon de clarté et d'honnêteté que m'a donnée Lee. À lui je sais qu'on peut faire totalement confiance, et c'est l'une des raisons de l'estime et de l'amitié profonde que j'ai pour lui.

Rome

J'ai consacré les longues années suivantes à développer la théorie. J'avais fini ma thèse. J'ai obtenu une bourse d'études de l'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare). N'étant pas lié à un groupe de recherche, je pouvais utiliser cette bourse pour aller où je le souhaitais. J'ai décidé de rejoindre l'Université de Rome, La Sapienza (La « Sagesse »), qui me semblait être l'endroit le plus intéressant en Italie sur le plan scientifique, en plus d'avoir un nom irrésistible. C'est à Rome que se trouvaient les plus grands physiciens théoriciens italiens, comme Gianni Jona-Lasinio, Giorgio Parisi, Nicola Cabibbo, Luciano Maiani et beaucoup d'autres. Le directeur du département m'attribua une table dans les sous-sols, où j'ai passé quelques années, absorbé dans le développement de la nouvelle théorie, ignoré par tout

le monde. Quand l'argent de ma bourse fut épuisé, je n'ai pas réussi à trouver un autre financement. Nicola Cabibbo, le directeur de l'INFN, avait entendu parler de mes résultats aux États-Unis et me proposa de m'obtenir un contrat à l'INFN. Mais il y eut un changement de situation politique dans l'INFN et rien n'en sortit.

J'économisais sur tout pour continuer à vivre, et j'ai dû demander de l'aide à mon père qui, malgré les obstacles, croyait en ma passion scientifique, me soutenait, et de temps en temps m'envoyait un petit chèque. C'étaient les temps difficiles de l'apprentissage. Je voulais devenir physicien, mais mon parcours professionnel semblait coincé dans une impasse. L'espoir de décrocher un poste à l'université était très mince, d'autant plus mince que je travaillais sur un sujet qui n'intéressait presque personne en Italie. Je traversais des moments d'angoisse.

Mais lorsque la nuit est la plus sombre et la plus froide, vient le moment où la lumière va apparaître. Un jour, le téléphone a sonné. C'était le directeur du département de physique d'une université américaine qui me demandait si je serais intéressé par un poste de professeur. Il s'agissait de l'université de Pittsburgh, où travaillait Ted Newman, l'un des plus grands spécialistes de la relativité générale.

À première vue, l'idée d'aller vivre dans une grande ville américaine peu charmante comme Pittsburgh ne m'emballait pas. Mais un de mes proches amis à Rome, Enzo Marinari, un soir qu'on se promenait ensemble le long de la fontaine de Trevi, m'a fait comprendre qu'il n'était pas très sage de préférer devenir chômeur en Italie plutôt que professeur aux États-Unis. Si je voulais acquérir la liberté de travailler sur ce qui m'intéressait, c'était bien là l'occasion à saisir.

J'ai passé dix ans à Pittsburgh, à travailler avec Ted et beaucoup d'autres collègues, à m'intéresser à de nombreux problèmes différents, de gravité quantique, de relativité générale, et d'autres sujets, mais surtout à développer la théorie des *boucles*.

La science ou l'exploration permanente de nouvelles façons de penser le monde

L'une des meilleures surprises que j'ai trouvées à Pittsburgh a été le *Center for the History and Philosophy of Science*, peut être le plus important centre de philosophie des sciences aux États-Unis. C'est une institution extraordinaire où se croisent tous les genres de visiteurs, et où l'on peut rencontrer tous les types d'idées. Toujours curieux et fasciné par la philosophie, j'ai assisté aux séminaires et aux conférences du Centre. J'ai pu côtoyer des philosophes éminents et spécialisés dans la philosophie de la physique, comme Adolf Grünbaum et John Earman. Ils étaient intéressés par les problèmes d'espace-temps, et tout disposés à discuter avec un physicien. Pour moi, c'était un élargissement formidable de mon horizon, ainsi qu'un retour aux intérêts de mes jeunes années. Un dialogue très actif s'est engagé, qui m'a fourni des idées et des perspectives essentielles pour mon travail de physicien.

Le dialogue entre science et philosophie

Je suis convaincu qu'aujourd'hui le dialogue entre la physique et la philosophie est vital. Dans le passé, ce dialogue a eu un rôle très important dans le développement de la science, particulièrement dans les moments d'évolution conceptuelle majeure de la physique théorique. Galilée et Newton, Faraday et Maxwell, Bohr, Heisenberg, Dirac et Einstein, pour ne mentionner que les exemples les plus importants, se sont nourris de philosophie, et n'auraient jamais pu accomplir les sauts conceptuels immenses qu'ils ont accomplis s'ils n'avaient eu aussi une éducation philosophique. Cela ressort de façon évidente de leurs écrits, dans lesquels les problèmes conceptuels et philosophiques jouent un rôle essentiel, en leur suggérant des questions et en leur ouvrant de nouvelles perspectives. L'influence directe d'idées philosophiques est très claire dans la naissance de la mécanique Newtonienne, de la théorie de la relativité et de la mécanique quantique par exemple.

Mais durant la seconde moitié du XX^e siècle, la physique fondamentale

s'est tenue à distance de ce dialogue avec la philosophie. La raison majeure en est que les problèmes qu'elle traitait avaient un caractère beaucoup plus technique que conceptuel. La mécanique quantique et la relativité générale venaient d'ouvrir de nouveaux territoires. Il était prioritaire d'en étudier les conséquences et les applications possibles. La physique atomique, la physique nucléaire, la physique des particules, la physique de la matière condensée et bien d'autres disciplines ont pu être développées sur la base conceptuelle bien établie de la mécanique quantique ; quant à l'astrophysique, la cosmologie, l'étude des trous noirs, ou des ondes gravitationnelles, c'est sur la base conceptuelle bien établie de la relativité générale qu'elles s'échafaudèrent. Seulement, aujourd'hui, en cherchant à combiner les deux théories de base, la physique se retrouve à nouveau confrontée à des problèmes fondamentaux. Je pense qu'une conscience philosophique développée s'avère à nouveau nécessaire.

Cela reste vrai aussi d'un point de vue méthodologique : un scientifique oriente toujours sa recherche en fonction d'idées à caractère épistémologique dont il est plus ou moins conscient. Et il vaut bien mieux en être conscient que de se laisser guider par des *a priori* méthodologiques dont on ignore la force.

La philosophie des sciences anglo-saxonne accorde beaucoup plus d'intérêt à la science contemporaine que la philosophie des sciences en Europe continentale. Par mon éducation italienne, je me sens souvent plus proche de la philosophie continentale européenne que de son pendant anglo-saxon, mais depuis que je me suis réinstallé en Europe, j'ai du mal à retrouver le dialogue que j'avais aux États-Unis avec toutes sortes de philosophes des sciences. Ce n'est pas impossible : par exemple, j'ai rencontré des partenaires de discussion très intéressants dans le groupe de Marisa Dalla Chiara et Federico Laudisa à Florence, et des interlocuteurs de choix à l'Ecole Polytechnique de Paris, comme Michel Petitot et Michel Bitbol, qui animent le CREA, le Centre de Recherches en Épistémologie Appliquée.

La pensée scientifique, qui est à la base de la modernité, soulève des problèmes fondamentaux. La pensée philosophique européenne de ce siècle ne devrait pas s'en tenir si éloignée, je pense. Mais le fossé entre la culture humaniste et la culture scientifique est encore loin d'être comblé. Dans la philosophie de la connaissance continentale, par exemple, l'idée diffuse que la vérité est seulement interne au discours a beaucoup de mal à se mettre en relation avec le discours scientifique.

Cette défiance réciproque entre le monde humaniste et le monde des sciences pèse aussi sur l'image que la société entière se fait de la science. Cette image s'est dégradée au long des dernières décennies.

D'un côté, la science est encore souvent considérée comme un ensemble de « vérités établies », à consulter selon les besoins, ou à vénérer, ou bien comme un ensemble de recettes techniques pour résoudre des problèmes.

De l'autre, et à l'inverse, la science est aussi dénoncée comme une négation des valeurs spirituelles, même une menace pour notre société, ou comme la base de la froide domination technologique, le lieu de l'arrogance myope des experts, ou même une source d'horreurs à la Frankenstein, quand les nouveautés apportées par la science font peur.

Ces visions déformées de la science ont pour conséquence une diminution de son aura, et la pensée irrationnelle gagne du terrain. Elles sont même en train de nourrir une sorte d'alliance diabolique entre multiculturalisme et anti-scientisme qui risque d'envahir notre société. Aux États-Unis, par exemple, dans plusieurs États (le Kansas « rural », mais aussi la « très civilisée » Californie), les enseignants n'ont pas le droit de parler correctement de l'Évolution à l'école. Les lois qui interdisent d'enseigner les résultats de Darwin sont justifiées par le relativisme culturel : on sait bien que la science se trompe, et donc une connaissance scientifique n'est pas plus défendable qu'une vérité biblique. Interrogé récemment sur ce sujet, un candidat à la présidence des États-Unis a déclaré qu'il « ne savait pas » si les êtres vivants ont vraiment des ancêtres communs. Sait-il seulement si c'est la Terre qui tourne autour du Soleil ou le Soleil qui tourne autour de la Terre ?

En Europe, nous n'en sommes heureusement pas là. Mais les tensions sont quand même fortes. Récemment, le gouvernement Italien a lui aussi cherché à introduire le créationnisme à l'école.

Les progrès de la médecine ont recommencé à faire peur, comme au XVII^e siècle, et avec le même genre de confusions. On pense par exemple que l'âme et l'identité sont dans l'ADN, et donc qu'un enfant cloné posséderait un double de l'âme de l'original ! Ça me rappelle, quand j'étais jeune, l'époque où le docteur Christiaan Barnard faisait les toutes premières transplantations cardiaques. Les journaux et les prêtres, terrorisés, se demandaient si Monsieur A, avec le cœur du pauvre Monsieur B, allait continuer à aimer sa femme, ou bien s'il allait aimer la veuve de Monsieur B... (puisque, comme tout le monde sait : c'est le cœur qui aime). Pour autant, dans les années soixante, on n'arrêta pas les transplantations cardiaques à cause de ces bêtises. Tandis qu'aujourd'hui l'animisme et la peur prennent souvent le dessus. Il est à craindre qu'on ne déclare bientôt diaboliques les vrais jumeaux, vu qu'ils partagent le même ADN et qu'ils sont donc le clone l'un de l'autre...

Les investissements dans la science fondamentale, la science qui fait « culture », qui cherche la connaissance de base, sont en chute libre. La société demande de moins en moins aux scientifiques d'être en quête « de connaissance ». Elle leur demande de développer des produits à vendre, et des armes.

J'espère fortement que toute cette confusion n'arrivera pas à mettre en danger notre confiance dans la force de la pensée rationnelle. Les représentations caricaturales de la science sont certainement liées à des fautes et des erreurs des scientifiques, mais elles sont aussi les résidus de traditions intellectuelles qui ont depuis longtemps montré leurs limites. Les emballlements pour la « Science triomphante » du positivisme dix-neuviémiste, et de ses épigones plus récents, ont depuis longtemps disparu, en particulier depuis la chute du Newtonisme et la réflexion douloureuse qui s'en est suivie sur la durée de vie limitée des théories scientifiques.

Par ailleurs, la réaction d'abord anti-technologique, puis également anti-scientifique, d'une certaine philosophie continentale n'a contribué qu'à accentuer la séparation stupide des « deux cultures » (humaniste et scientifique) : une séparation qui rend aveugle à la complexité et à la richesse de notre compréhension du monde.

La science est bien autre chose que toutes ces caricatures.

Qu'est-ce donc que la Science ?

Peut-être la plus grande découverte scientifique du XX^e siècle est-elle le fait que la science « se trompe ». Que les représentations du monde développées par la science peuvent être, dans un sens précis et vérifiable, fausses. Et donc que l'on peut avoir plusieurs lectures du monde et que chacune ne peut être considérée comme vraie que jusqu'à un certain point.

On découvrit au début du XX^e siècle que le schéma conceptuel Newtonien, qui était LE modèle absolu de la science efficace, ne marche pas toujours. Il doit être révisé en profondeur pour comprendre les phénomènes physiques nouveaux auxquels nous accédons désormais. Cette découverte étonnante a provoqué une onde de choc qui s'est propagée dans la communauté scientifique. Son effet sur la philosophie des sciences fut encore plus fort. On peut dire que, pour une large partie, la philosophie des sciences a passé le dernier demi-siècle à tenter de s'accommoder de cette découverte.

Or, je pense que c'est précisément dans la découverte des limites des représentations scientifiques du monde que se révèle la force de la pensée scientifique. Celle-ci n'est pas dans les « expériences », ni dans les « mathématiques », ni dans une « méthode ». Elle est dans la

capacité propre de la pensée scientifique à se remettre toujours en cause. Douter de ses propres affirmations. N'avoir pas peur de nier ses propres croyances, même les plus certaines. Le cœur de la science est le changement.

La démarche scientifique est une poursuite continue de la meilleure façon de penser le monde. C'est une exploration de formes de pensée. C'est là qu'elle puise son efficacité. Cela ne veut pas dire que les réponses scientifiques sont toujours justes. Mais que, dans les domaines où la pensée scientifique fonctionne, les réponses scientifiques sont, par définition, les meilleures qu'on a trouvées jusque-là.

Cette image d'une science fluide, en révolution permanente, toujours suspendue entre la connaissance et le doute, toujours en quête et jamais bêtement satisfaite de ses résultats, est profondément différente de celle que nous avait laissée le XIX^e siècle. Celle-ci est encore très répandue dans la société et, à bien regarder, c'est elle la vraie cible des critiques de l'anti-scientisme et du relativisme culturel. Dans un certain sens, rien n'est plus au fait du caractère relatif de notre culture que la science elle-même. La science évolue en continu précisément parce qu'elle a une pleine conscience des limites de toutes les connaissances. Sa force réside dans son manque de confiance en ses propres concepts. Elle ne croit jamais complètement en ses résultats. Elle sait que nous ne pouvons penser le monde que sur la base fragile de nos connaissances, mais cette base est en évolution constante.

On pourrait comparer toute science à une entreprise de cartographie. La carte n'est pas le territoire, mais c'est la meilleure représentation qu'on puisse en faire – en particulier si l'on veut y voyager. Avec peu de signes, on encode la plus grande partie du monde possible. Quelques symboles, et il prend sens. Mais il s'agit bien d'une carte. Et il y a d'autres cartes.

Donc, ce qui me semble vraiment intéressant, ce sont moins les représentations scientifiques du monde que leur *évolution* continue. Ce sont moins les merveilles que la science a découvertes, que la magie d'une forme de pensée capable de mettre en doute ses propres affirmations et de nous apprendre, décennie après décennie, à changer notre façon de regarder le monde.

Histoire de l'espace : Anaximandre

Le changement des notions d'espace et de temps, dont je parle dans ce livre, n'est qu'un exemple de cette évolution continue qu'est la science. Ces deux notions, fondamentales dans notre vision du monde, ont été récemment modifiées par la pensée d'Einstein et sont encore en train

de changer aujourd'hui.

C'est une démarche qui n'est pas du tout propre à la science moderne. Einstein n'est pas le premier à avoir changé en profondeur notre vision du monde. Beaucoup l'ont fait avant lui, et de manière plus révolutionnaire encore : Copernic et Galilée ont convaincu tout le monde que la Terre sous nos pieds voyage à 30 kilomètres par seconde, Faraday et Maxwell ont rempli l'espace de champs électriques et magnétiques, Darwin nous a convaincus que nous avions des ancêtres communs avec les coccinelles...

La démarche est en fait beaucoup plus ancienne que cela. Et je pense qu'on ne peut pas vraiment comprendre ce que ces changements modernes de la notion d'espace signifient, si on ne les resitue pas dans leur contexte historique. Permettez-moi, donc, de raconter le début de cette très belle histoire.

Toutes les civilisations anciennes ont pensé que le monde était structuré en deux parties : la Terre en bas et le Ciel en haut. Cette conception du monde était la même pour les Égyptiens, les Hébreux, les Mésopotamiens, les Chinois, les premières civilisations de la vallée de l'Indus, aussi bien que pour les Mayas, les Aztèques ou les Indiens d'Amérique du Nord. Pour toute l'humanité ancienne, donc, l'espace avait naturellement un « haut » et un « bas ». Les choses tombent vers le bas. En haut, il y a le ciel, et en bas la terre. Et en dessous de la terre, il y a encore de la terre, ou bien peut-être une grande tortue, ou bien de grands piliers – en tout cas quelque chose sur quoi la terre s'appuie, qui la soutient et l'empêche de tomber.

Nous connaissons le nom de l'homme qui, le premier, a changé cette image ancienne du monde : Anaximandre, scientifique et philosophe qui vécut six siècles avant Jésus-Christ à Millet, ville grecque sur la côte de la Turquie d'aujourd'hui. C'est lui qui a suggéré, et est arrivé à imposer à tous, une nouvelle lecture du monde : la Terre est un gros caillou qui flotte dans l'espace. Le ciel n'est pas seulement au-dessus de la Terre : il est tout autour de la Terre, y compris au-dessous.

Comment a-t-il fait pour comprendre que la Terre est un caillou de dimension finie qui flotte dans l'espace ? Eh bien, les indices étaient nombreux. Pensons par exemple au Soleil, à la Lune, et à toutes les étoiles qui se couchent à l'ouest et qui réapparaissent à l'est. N'indiquent-ils pas assez clairement qu'ils doivent passer *sous* la Terre pour accomplir leur cercle ? Et que donc il doit y avoir de l'espace ouvert là-dessous ? En fait, Anaximandre n'a fait qu'appliquer la même intuition qui nous dit que lorsque nous voyons quelqu'un disparaître derrière une maison et réapparaître de l'autre côté, cela signifie qu'il doit y avoir un passage derrière la maison. Il y a aussi d'autres indices, plus subtils, mais très convaincants. Par exemple, l'ombre de la Terre

qui se projette sur la Lune durant une éclipse fait bien voir que la Terre est un objet fini.

Alors, est-ce que c'était facile ? Non, ce ne l'était pas, puisque des millions d'hommes pendant des siècles de civilisation n'y avaient pas pensé. Pourquoi était-il si difficile de trouver cette idée ? Parce qu'elle révolutionnait profondément l'image du monde.

Les hommes sont attachés à leurs idées, et ils n'en changent pas facilement. Ils pensent toujours qu'ils savent déjà tout. Les idées neuves font peur parce qu'elles déconcertent. N'est-elle pas déconcertante, quand on y pense bien, cette idée que la Terre ne s'appuie sur rien ? Pourquoi ne tombe-t-elle pas ? La question, évidemment, a été posée tout de suite à Anaximandre, et nous connaissons sa réponse : parce que les choses ne tombent pas « vers le bas », les choses tombent « vers la Terre » ; et donc la Terre n'a aucune direction particulière vers laquelle tomber, si ce n'est vers elle-même. Encore une fois, à la lumière de notre compréhension du monde d'aujourd'hui, la réponse d'Anaximandre est correcte. Mais elle est déconcertante : Anaximandre redessine complètement le cadre conceptuel de notre compréhension humaine de l'espace, de la Terre, de la gravité qui fait tomber les corps. Sur la base des observations, et pour mieux expliquer ces observations, il propose une nouvelle carte du monde, une carte conceptuelle différente. Une idée profondément neuve de la façon dont est organisé l'espace. Non plus un espace scindé en deux, un « en haut » et un « en bas », mais un seul espace fait du ciel à l'intérieur duquel flotte la Terre et dans lequel les choses tombent vers la Terre. C'est une image du monde meilleure et plus générale que la précédente.

Anaximandre écrivit un livre, dans lequel il proposa, parmi d'autres, cette idée, et présenta ses arguments pour la défendre. L'idée, lentement, prit pied. À la génération suivante, dans l'école pythagoricienne des villes grecques de l'Italie du Sud, on parle déjà communément d'une terre sphérique entourée par les cieux. Le texte le plus ancien qui nous est parvenu parlant de la Terre sphérique est le *Phédon* de Platon, où cette idée est présentée comme crédible mais pas complètement démontrée. Mais déjà à la génération suivante, un peu plus d'un siècle après Anaximandre, Aristote considère l'idée de la Terre sphérique qui flotte dans l'espace comme acquise, et il fait la liste des nombreux arguments, très convaincants, qui l'appuient. En quelques générations, l'idée très audacieuse d'Anaximandre est donc devenue opinion commune. À partir du monde grec, cette idée se répandra ensuite à toute l'humanité.

Je pense qu'Anaximandre est non seulement l'un des premiers scientifiques dont nous avons connaissance, mais aussi l'un des plus

grands que l'humanité ait jamais eu. Sa découverte du fait que la Terre flotte dans l'espace sans tomber est peut-être la première, et certainement l'une des plus belles illustrations de ce qu'est la Science : la capacité de changer en profondeur notre image du monde, sur la base des observations et de la pensée rationnelle. La capacité de mettre en discussion des idées et des représentations du monde acquises, et d'en trouver d'autres, plus efficaces. Telle est la grande force visionnaire de la science qui m'a toujours fasciné.

Quand les nouvelles images du monde sont bien vérifiées, elles deviennent lentement la nouvelle lecture commune du monde. Le fait que la structure de l'espace est modifiée à proximité d'un corps massif deviendra un jour connaissance commune, et l'idée d'un espace rigide et homogène partout deviendra risible, comme il est niais de penser que la Terre doit s'appuyer sur quelque chose pour ne pas tomber.

Dans cette démarche de reconstruction continue de l'image du monde, la substance même du monde ou, pour mieux dire, notre façon de la concevoir, se modifie continuellement. Là aussi, Anaximandre est à l'origine de cette extraordinaire aventure : il introduit, pour expliquer tous les phénomènes, une entité qu'il dénomme l'*apeiron* (traduit par certains auteurs comme « ce qui n'a pas de distinctions, indéfini », et par d'autres comme « l'illimité »). C'est le premier objet théorique, le grand-père des atomes, des particules élémentaires, des champs physiques, de l'espace-temps courbe, des quarks, des cordes, des boucles, grâce auxquels nous repensons le monde.

Ce cheminement révolutionnaire, qui déboucha sur des visions du monde radicalement nouvelles, n'a donc pas été inventé par Einstein : il est caractéristique de la Grande Science. Le rôle particulier d'Einstein a « seulement » été, en exagérant un peu, de réveiller la science fondamentale d'une certaine léthargie, résultat de l'immense succès des théories de Newton.

Histoire de l'espace : L'espace comme relation ou comme entité ?

L'image de l'espace qui a été dominante depuis Aristote jusqu'à Newton, est celle d'un espace structuré, formé par les objets mêmes du monde. L'espace était surtout vu comme l'ordre dans lequel les objets se touchent. Dans la tradition scientifique et philosophique occidentale, donc, l'idée de Newton, selon laquelle l'espace est une *entité* qui peut exister même quand rien d'autre n'existe, n'était pas du tout le point de vue dominant sur la nature de l'espace.

Newton a imposé l'image de l'espace-boîte, une entité indépendante des objets qui se déplacent en elle, non sans effort et non sans

rencontrer une résistance féroce dans la pensée de son temps. Cette opposition ne venait pas tant des savants de la vieille école aristotélicienne que des champions de la *Scientia Nova*, la Nouvelle Science, qui croyaient à la récente révolution copernicienne, et qui voyaient en René Descartes leur maître à penser. La représentation que Descartes se faisait de l'espace était en effet très différente de celle de Newton, et se plaçait dans la droite ligne de la tradition occidentale depuis Aristote. Pour Descartes, en effet, comme pour Aristote, il n'y a pas d'entité « espace ». Il n'y a pas, par exemple, d'espace vide. Il n'y a que des objets (des cailloux, des murs, des chaises, de l'air, de l'eau...). Ces objets peuvent être dans une relation les uns avec les autres, une relation de « contiguïté ». C'est-à-dire : ils peuvent se toucher, ou pas. L'espace, alors, n'est rien d'autre que l'ordre que cette relation de contiguïté détermine entre les objets. Par exemple, Aristote définit la position d'un objet comme n'étant rien d'autre que la frontière interne de l'ensemble des autres objets qui l'entourent – une sorte de position « en creux » définie par les voisins immédiats. Pour Descartes, le mouvement d'un objet A est défini comme le passage de la contiguïté d'un objet B à la contiguïté d'un autre objet C. D'un objet seul, il est donc impossible de dire s'il est en mouvement ou non.

Pour Newton, au contraire, les objets se trouvent dans l'espace. Celui-ci a une structure qui lui est propre, et qui n'a rien à voir avec les objets qui peuvent s'y trouver ou non. Un objet bouge lorsqu'il passe d'un point de l'espace à un autre point de l'espace. Dans la première interprétation de l'espace, aristotélicienne-cartésienne, l'espace n'est pas une entité, c'est une *relation entre des choses*. Dans la deuxième, newtonienne, l'espace est une *entité* qui existe et a une structure, même en l'absence de tout objet.

Est-ce que le choix entre ces deux possibilités est un problème scientifique, ou bien est-ce un problème seulement philosophique ? C'est un problème scientifique, mais pas dans le sens où la science donnerait la vision « juste » de l'espace. Le rôle de la science est de comprendre laquelle de ces deux visions de l'espace sera la meilleure pour penser le monde de la façon la plus efficace. On est ici au cœur du problème de la vérité des énoncés scientifiques. Newton affronte le problème de la nature de l'espace dans son œuvre majeure, les *Principia Mathematica*, dont la première partie est consacrée à la nature de l'espace. Son point fort, la raison pour laquelle sa solution est finalement la meilleure, c'est qu'il construit une façon de penser le monde, fondée sur sa vision de l'espace, qui fonctionne incroyablement bien.

Souvenez-vous de l'équation que vous avez apprise au Lycée : $F = ma$, où F est la force, m la masse et a l'accélération. Cette équation est la base de toute la mécanique newtonienne. Or, il faut bien que nous

soyons capables de mesurer l'accélération. Mais l'accélération est une mesure du mouvement. Mouvement par rapport à quoi ? Par rapport à l'espace absolu dans lequel il se trouve. Pour que la théorie fonctionne, il *faut* que l'on puisse dire si un objet accélère ou n'accélère pas, dans l'absolu. Pour Newton, l'accélération se comprend par rapport à l'entité « espace », alors que pour un aristotélicien-cartésien, cette notion d'accélération absolue n'a pas de sens, puisqu'on ne peut pas dire si un objet bouge sans le comparer à un autre objet.

La construction de Newton fonctionne tellement bien que nous continuons à l'utiliser aujourd'hui pour construire des maisons et des ponts, faire voler des avions, et encore dans bien d'autres applications technologiques. Mais la vieille idée aristotélicienne et cartésienne de l'espace comme relation, et les critiques de l'idée d'un espace entité, ont continué à être défendues par des penseurs comme Leibniz, Berkeley et Mach. À travers eux, cette idée est arrivée à Einstein, qui en a fait la base profonde de sa théorie de la relativité générale.

Le débat philosophique autour du concept d'espace comme entité ou comme relation a traversé les siècles, fournissant à des scientifiques comme Newton et Einstein des sujets de réflexion et d'inspiration, et il n'a toujours pas épuisé son potentiel. Aujourd'hui, je pense, il faut réfléchir à nouveau à ce problème si l'on veut comprendre les propriétés quantiques de la gravitation. Une théorie complète de la gravitation quantique ne sera probablement construite qu'en abandonnant complètement l'idée newtonienne de l'espace comme entité. L'espace n'est pas une entité dans laquelle les objets sont localisés : l'entité « espace » n'existe pas. Seul le champ gravitationnel existe, au même titre que les autres champs. En gravitation quantique, les *boucles* sont les quanta de champ gravitationnel et ce sont leurs relations qui constituent l'espace.

Mais que savons-nous donc vraiment ?

La base même de la science est donc la pensée critique : la conscience forte que nos visions du monde sont toujours partielles, subjectives, imprécises, provinciales et simplistes. Il faut sans cesse chercher à comprendre mieux. À ouvrir les horizons. À trouver un point de vue plus large. Cela n'est ni commode ni naturel car, d'une certaine façon, nous sommes prisonniers de nos pensées. Il est par définition impossible de sortir de notre propre pensée. On ne peut pas la regarder de dehors et la modifier. C'est de l'intérieur de nos erreurs qu'il faut travailler pour découvrir où nous sommes en train de nous tromper. Cela revient, pour utiliser une belle et célèbre image, à reconstruire son bateau tout en naviguant. La science, c'est cela : un

effort continu pour reconstruire et restructurer notre propre pensée alors même que nous sommes en train de penser.

Aucune forme de connaissance humaine ne permet de faire des *prédictions* fiables comme celles de la science. Si les astronomes nous affirment que le mois prochain il y aura une éclipse de Soleil, nous pouvons parier qu'ils ont raison. Bien sûr, une étoile à neutrons pourrait arriver sur nous à une vitesse proche de celle de la lumière, et arracher la Lune, mais ce n'est vraiment pas probable.

Toutefois, toutes les théories scientifiques ont été, un jour ou l'autre, remplacées par des théories meilleures. Même les plus efficaces. L'efficacité du modèle de Ptolémée, par exemple, est stupéfiante : nous pouvons, aujourd'hui encore, ouvrir son livre, écrit il y a dix-neuf siècles, et utiliser ses tables et sa géométrie pour prédire avec exactitude la position de Vénus dans le ciel le mois prochain. Néanmoins, nous savons que le monde n'est pas bien décrit par les « épicycles » et les « déférents » utilisés par Ptolémée. Encore plus impressionnant est le succès de la théorie de Newton, que nos ingénieurs utilisent chaque jour pour construire ponts et avions. Néanmoins, même la théorie newtonienne, si bien établie, s'est révélée fausse.

Pouvons-nous vivre avec cette incertitude ? À quelle connaissance pouvons-nous nous fier ? Pourrons-nous jamais être certains que ce que la science nous dit du monde est vrai ? On peut rêver qu'un jour une théorie « finale » sera trouvée. Mais ce rêve me semble futile : ce que nous ne savons pas de la Nature est immense et les problèmes ouverts en physique théorique sont tellement fondamentaux que je ne nous crois pas proches de la fin du chemin.

Alors, pourquoi la science est-elle crédible ? Pas parce qu'elle nous dit des choses certainement vraies, mais parce que ses réponses sont les meilleures que nous ayons pour le moment. Et ce presque par définition : si une réponse meilleure apparaît, c'est cette réponse qui sera « scientifique ». Ainsi, la physique de Newton était synonyme de science jusqu'à Einstein ; mais quand Einstein a trouvé une meilleure image du monde, où l'espace est courbe, le temps pas le même pour tout le monde, et la lumière faite de photons, la sortie du « newtonianisme » n'a pas été saluée comme la fin de l'ère scientifique. Bien au contraire, nous pensons qu'Einstein est un scientifique remarquable.

Si la médecine Tibétaine nous apprend qu'une certaine plante, ou une certaine technique, ou un certain comportement du médecin, aident la guérison, et si l'efficacité de ce soin devient bien vérifiée empiriquement, le soin tibétain n'est pas « anti-scientifique » : il devient partie intégrante de la médecine « scientifique ». Plusieurs de

nos médicaments ont une origine de ce genre, d'ailleurs.

La pensée scientifique est consciente de notre ignorance. Je dirais même que la pensée scientifique est la conscience même de notre grande ignorance et donc de la nature dynamique de la connaissance. C'est le doute, et non pas la certitude, qui nous fait avancer. C'est là, bien sûr, l'héritage profond de Descartes. Nous devons faire confiance à la science non parce qu'elle offre des certitudes, mais parce qu'elle n'en a pas.

Je ne sais pas si l'espace est « vraiment » courbe, comme le veut la relativité générale, mais je ne connais pas, aujourd'hui, une façon d'envisager le monde physique plus efficace que de penser l'espace comme courbe. Les autres visions du monde ne rendent pas aussi bien compte de la complexité du monde.

L'obsession scientifique de remettre toute vérité en question ne mène pas au scepticisme, ni au nihilisme, ni à un relativisme radical. La science est une pratique de la chute des Absolus qui ne tombe pas dans le relativisme total ou le nihilisme. Elle est l'acceptation intellectuelle du fait que les connaissances évoluent. Le fait que la vérité puisse toujours être interrogée n'implique pas qu'on ne puisse pas se mettre d'accord. En fait, la science est le processus même par lequel on arrive à se mettre d'accord.

Cette aventure ne se base pas uniquement sur la froide rationalité. La rationalité, c'est ce qui est nécessaire pour formaliser la démarche. Mais au départ, toutes les grandes découvertes ont été des intuitions. La science est ce qui sort d'un rêve, qui s'avère plus efficace que d'autres rêves dominants, et qui devient le rêve commun de tout le monde.

Quand j'étais petit et que je posais des questions sur les nuages, mon père me les décrivait comme des bateaux navigant dans le ciel. Plus tard, il m'a expliqué qu'en fait c'était des gouttelettes d'eau en suspension dans l'air et cela a transformé complètement ma façon de voir les nuages. Mais peut-on dire qu'une vision a effacé l'autre ? Non, je dirais plutôt qu'elles coexistent et s'enrichissent mutuellement. Voir les nuages à la façon du météorologue n'empêche en rien de voir les nuages à la façon du poète.

La science s'est construite comme un raffinement progressif de la façon de chercher des réponses, mais elle n'existerait pas sans cette insatiable manie de poser des questions, cette manie que l'on trouve déjà, et surtout, chez les enfants de quatre ans. La science ne commence pas à l'université – elle s'enracine dans cette curiosité et cet appétit de connaître qui nous caractérise dès la plus tendre enfance. À quatre ans, nous n'avons pas peur de laisser tomber nos préjugés et de changer notre vision du monde, et nous apprenons donc beaucoup.

La société entière peut continuer à apprendre pour autant qu'elle n'ait pas peur de laisser tomber ses innombrables préjugés. Cette recherche est une aventure qui continue. C'est peut-être la plus grande aventure de l'histoire de l'humanité.

Grains d'espace, réseaux de spin, cosmologie primordiale et chaleur des trous noirs

Pendant les années où je résidais aux États-Unis, je suis retourné en Italie chaque été, et souvent Abhay Ashtekar, ou Lee Smolin, ou les deux, m'accompagnaient. Ils étaient devenus mes amis et principaux collaborateurs. Nous profitons de ces vacances en Italie pour travailler ensemble.

Plusieurs étapes dans le développement de notre théorie ont été atteintes en Italie, pendant ces visites. Par exemple, c'est à Trente, tous les trois, que nous avons commencé à comprendre comment décrire l'espace macroscopique en mettant ensemble un grand nombre de *boucles*. C'est aussi à Trente que nous avons compris, suite à un calcul qui ne marchait pas, que la taille des boucles n'était pas infinitésimale, comme nous le pensions au début : leur taille était très petite mais finie.

Il y avait un aspect étrange de la théorie que nous n'arrivions pas à comprendre : d'un point de vue mathématique, on constatait que ces *boucles* qui constituent l'espace présentaient des *intersections* : elles passaient l'une dans l'autre à certains endroits. Nous ne parvenions pas à comprendre ce que représentaient ces intersections.

Réseaux de spin

Vers le milieu des années quatre-vingt-dix, pendant que Lee était à Vérone, nous avons travaillé à l'aide d'une méthode de calcul assez classique en mécanique quantique. En mécanique quantique, comme on l'a vu, beaucoup de grandeurs sont « quantifiées ». Cela signifie qu'elles ne peuvent pas prendre n'importe quelle valeur, mais seulement certaines valeurs discontinues. L'énergie d'un atome, par exemple, ne peut pas avoir une valeur arbitraire, mais seulement certaines valeurs particulières : les niveaux d'énergie de l'atome. Pour calculer les valeurs qu'une grandeur physique peut prendre, on utilise une technique qui s'appelle « calcul du spectre de l'opérateur ». En ce qui nous concerne, nous étions intéressés par une grandeur physique particulière : le *volume*.

Qu'est-ce qu'un volume ? C'est la mesure de la quantité d'espace. Le volume d'une pièce est la quantité d'espace qu'il y a dans cette pièce. Mais comme l'espace est devenu le champ gravitationnel, le volume mesure le champ gravitationnel. Et comme nous étions aux prises avec une théorie quantique, il y avait de fortes chances que le volume ait des valeurs discontinues, et donc qu'il puisse y avoir des « grains » de volume. Les calculs se sont avérés compliqués. Nous avons réussi à les résoudre, grâce aussi à l'aide d'un grand mathématicien anglais, Roger Penrose, que nous sommes allés consulter lorsque nous nous sommes aperçus que nos calculs conduisaient à des objets mathématiques que Roger avait étudiés vingt ans plus tôt, et qu'il avait appelé *spin networks*, ou « réseaux de spin ».

Résultat du calcul : le volume était en effet une variable non continue, et donc l'espace est constitué de quanta de volume, ou de quanta d'espace. Or, nous avons découvert que ces quanta d'espace se trouvent exactement aux intersections des *boucles*. Autrement dit, le volume est composé de quanta, de *grains d'espace*, et les intersections des *boucles* représentent justement ces grains d'espace. Elles sont les grains d'espace que nous cherchions.

Ces résultats ont quelque peu changé notre représentation initiale. Les intersections sont devenues plus importantes que les lignes. Nous avons cessé de parler d'un ensemble de *boucles* avec des points d'intersection, pour parler d'un ensemble de points, les intersections, reliés entre eux par des liens, c'est-à-dire par un *réseau*. Sur un même lien allant d'une intersection à l'autre on peut rencontrer plus qu'une seule ligne de Faraday. Le nombre de lignes de Faraday superposées sur le même lien est un nombre entier qu'on associe à chaque lien, et qui s'appelle le *spin* du lien. (Pour des raisons historiques, on utilise la moitié de ce nombre, qui est un nombre demi-entier, comme $\frac{1}{2}$, 1, $\frac{3}{2}$, 2, $\frac{5}{2}$...). De là, le nom de *réseau de spin*.

L'image qui résulte de l'espace quantique est surprenante : les nœuds du réseau de spin sont les grains d'espace. Les lignes reliant les points les uns aux autres représentent les relations spatiales entre eux. Elles expriment quel grain se trouve en contact avec quel autre grain. C'est ce qu'illustre la figure 5.

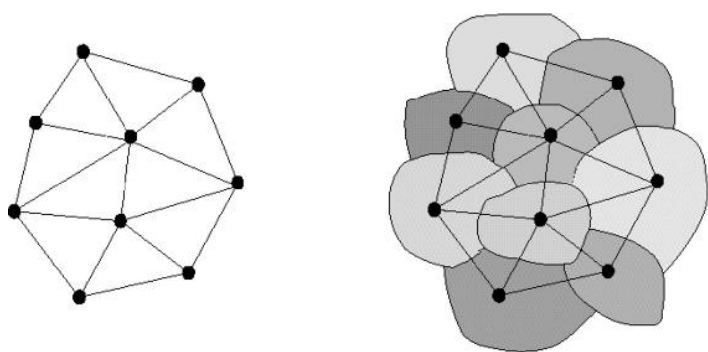


Fig. 5.1 Un « réseau de spin » (à gauche) est formé des lignes de Faraday du champ gravitationnel ; les points d'intersection, indiqués par des points noirs, sont les « nœuds » du réseau. Ceux-ci représentent des « grains d'espace » (à droite). Les liens du réseau représentent les relations de voisinage entre les grains d'espace.

Le calcul du « spectre de volume » fournit exactement les valeurs du volume qui peuvent être observées. Le même calcul peut être fait pour l'aire d'une surface. Dans ce cas, on calcule le « spectre de l'aire ». La théorie prédit avec précision un ensemble de nombres représentant les résultats possibles pour des mesures très précises du volume et de la surface.

Donc la théorie de la gravitation à *boucles* prédit que si nous mesurons une surface de façon exacte, nous ne pouvons pas trouver n'importe quel nombre, mais seulement l'un de ces nombres qui sont sur la liste obtenue par le calcul du spectre.

Quand nous disons que le *volume* d'une boîte est d'un mètre cube, nous comptons en réalité combien de grains d'espace, ou plutôt combien de « quanta du champ gravitationnel » il y a dans la boîte. Les quanta sont évidemment très petits. Dans une boîte d'un mètre cube, leur quantité est donnée par un nombre d'une centaine de chiffres.

De la même façon, quand nous disons que la *surface* d'une page de ce livre est, disons, de deux cents centimètres carrés, nous comptons en réalité le nombre de liens du réseau, ou mieux de *boucles* élémentaires, qui traversent la page. À travers une page de ce livre, cette quantité est donnée par un nombre d'environ soixante-dix chiffres. C'est ce que montre la figure 6.

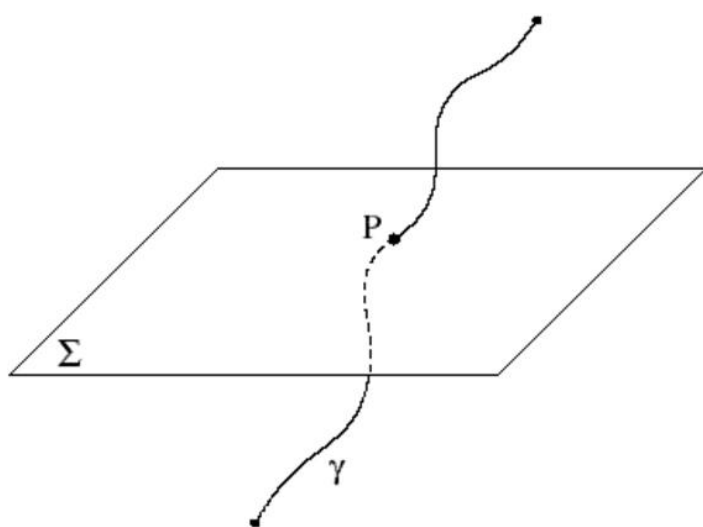


Fig. 5.2 Une surface Σ est traversée par une boucle (dont on n'a dessiné qu'un segment), au point P . La mesure de la surface est déterminée par le nombre de boucles qui la traversent. Une page de ce livre est traversée par environ 10^{70} boucles, c'est-à-dire un nombre à soixante-dix chiffres.

La technologie actuelle n'est pas suffisante pour vérifier ces prédictions. Mais il est très important que la théorie fournisse des prédictions précises et, au moins en principe, vérifiables. Si elle ne le faisait pas, ce ne serait pas une théorie scientifique. Jusqu'à ce jour, la théorie de la gravitation à boucles est la seule théorie de gravitation quantique qui fournit un ensemble de prédictions non ambiguës et articulées, en principe vérifiables.

Les réseaux de spin fournissent une description mathématiquement précise de la structure quantique de l'espace. Plus précisément, du fait que nous avons affaire à la mécanique quantique – et donc aux probabilités – la théorie est formulée en termes de nuages de probabilités associés à ces réseaux de spin. Il faut s'imaginer que ces réseaux de spin qui constituent le monde fluctuent, vibrent et fourmillent, un peu comme les points noirs et blancs d'une télévision analogique sans antenne, et les mathématiques de la théorie décrivent cette agitation des réseaux spin. L'espace physique peut donc être décrit par un nuage de probabilité de réseaux de spin.

Un aspect assez surprenant de cette histoire est le fait que Roger Penrose avait « inventé » les réseaux de spin sur la base de sa seule imagination, comme une tentative de décrire l'espace quantique. Et voilà que nous avons retrouvé ces mêmes réseaux de spin comme une conséquence de la théorie de la relativité générale et de la mécanique quantique.

John Wheeler

L'idée intuitive d'un espace qui n'est plus continu à très petite échelle avait déjà été suggérée par John Wheeler, un des deux auteurs de l'équation de Wheeler-DeWitt, dans les années soixante. La théorie des boucles est une concrétisation mathématique précise de cette idée.

Le jour où John Wheeler, ce grand homme et vétéran de la gravitation quantique, m'a envoyé un mot plein d'affection et d'enthousiasme pour nos résultats et m'a invité à Princeton pour exposer notre théorie, fut un jour de grande émotion pour moi.

Dans sa jeunesse, John Wheeler avait été un collaborateur de Niels Bohr, l'un des géants de la physique du début du XX^e siècle. Il avait participé avec lui à la naissance de la mécanique quantique. Puis il s'était consacré à la physique nucléaire et il comptait parmi les créateurs de l'un des premiers modèles du noyau atomique. Il avait passé la guerre aux États-Unis, où il a joué un rôle central dans les événements tragiques liés à la bombe atomique. C'est lors d'une discussion dans son bureau que la décision a été prise d'écrire à Roosevelt pour l'inciter à fabriquer la bombe atomique parce qu'on craignait que les Allemands ne la fabriquent les premiers – crainte qui s'est révélée infondée par la suite. Après la guerre, Wheeler a travaillé sur la gravitation et est devenu le collaborateur principal d'Einstein. C'est lui qui a introduit le terme si populaire de « trou noir ». Et c'est lui qui a eu une série d'intuitions et d'idées très importantes qui sont à la base de la recherche en gravitation quantique. Il a suggéré que l'espace-temps, à l'échelle la plus petite, était une sorte de mousse fluctuante (une mousse d'espace-temps). Avec Bryce DeWitt, un autre grand scientifique américain, il a formulé la fameuse équation qui allait devenir l'équation fondamentale de la gravitation quantique. Parmi ses étudiants se trouvait Richard Feynman, peut-être le plus grand physicien de la seconde moitié du XX^e siècle. Bref, ce fut un protagoniste de premier plan de tout le développement de la physique moderne. Vous pouvez donc imaginer quelle fut mon émotion en recevant sa lettre !

Dès mon arrivée, Wheeler est venu me voir dans le *Bed and Breakfast* où j'avais trouvé à me loger. Nous avons pris le petit-déjeuner ensemble et puis il m'a accompagné dans une longue promenade à travers le campus. Je lui ai expliqué les résultats de nos calculs, tandis que lui me racontait ses histoires extraordinaires : Bohr, la bombe atomique... « Tu vois, Carlo, me disait-il, quand Einstein est arrivé ici la première fois, fuyant l'Allemagne nazie, je suis allé le chercher au petit matin, comme je viens de le faire avec toi, et nous nous sommes promenés le long du même parcours... ». Pourquoi le voisinage, même indirect, des hommes qui ont laissé le plus de traces dans notre pensée

nous donne-t-il tant d'émotion ? Ce sont des hommes comme les autres, bien sûr, avec leurs faiblesses et leur humanité comme tout le monde, mais la fascination que nous avons éprouvée pour leurs idées leur confère une aura qui nous enchante. Ils nous ont ouvert des chemins que nous avons le privilège de pouvoir suivre, et de ce fait éveillent admiration, gratitude et affection.

John me parlait à voix basse. Il était âgé, et faible, mais son énergie intérieure était encore là, intacte. Il défendait avec passion sa participation à l'horrible aventure de la bombe atomique, contre mes objections de pacifiste radical. Quand je lui ai montré mon image de la structure de l'espace (la figure 3 de la page...), il a souri comme un enfant et il est allé chercher une image très similaire qu'il avait dessinée longtemps auparavant, et qui se trouve dans l'un de ses livres (figure 7)...

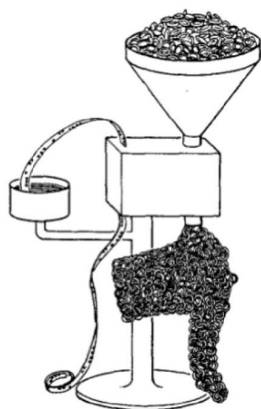


Fig. 5.3 L'image des « Dix milles boucles qui peuvent former l'espace temps », dans le livre « Gravitation » de Misner, Thorne et Wheeler, que John Wheeler m'a montré à Princeton, quand je lui ai parlé de mes boucles (figure 3)

Tester la théorie ?

Aujourd'hui, la gravitation quantique à *boucles* est étudiée par un grand nombre de chercheurs dans le monde entier, qui l'ont développée dans différentes directions. La théorie trouve des applications dans des champs variés, par exemple en cosmologie, pour étudier le Big Bang – les tout premiers moments de l'Univers –, et aussi pour étudier les propriétés des trous noirs, en particulier leurs propriétés thermiques.

L'application de la théorie des *boucles* aux trous noirs rejoint une étrange découverte faite dans les années soixante-dix par Stephen

Hawking. Stephen est célèbre parce qu'il est parvenu à poursuivre son travail scientifique alors qu'une terrible maladie le force à vivre en chaise roulante et à communiquer au moyen d'un ordinateur qu'il commande à la main. Un de ses résultats les plus importants est la découverte théorique que les trous noirs sont « chauds », c'est-à-dire qu'ils se comportent exactement comme des corps chauds : ils émettent une radiation thermique d'une certaine température.

Or, nous savons qu'en général les objets sont chauds parce que leurs constituants microscopiques sont en mouvement. Un morceau de fer chaud est un morceau de fer dans lequel les atomes de fer vibrent rapidement autour de leurs positions d'équilibre. Mais si un trou noir est chaud, que sont ces « atomes » élémentaires qui vibrent ?

La théorie des *boucles* apporte une réponse. Les « atomes » élémentaires d'un trou noir, qui vibrent et sont responsables de sa température, sont précisément les boucles individuelles qui se trouvent à la surface du trou noir. En utilisant cette théorie, on est capable de comprendre et de dériver le résultat de Hawking en termes des « vibrations » microscopiques des *boucles*. C'est un test important de la cohérence de la théorie des boucles, et donc un de ses succès. Mais ce n'est pas un vrai test expérimental.

Pendant longtemps, on a cru que toute possibilité de vérification expérimentale réelle resterait hors de notre portée. Mais récemment plusieurs idées ont surgi qui permettraient de tester la théorie en observant des conséquences indirectes de la granularité de l'espace.

Par exemple, si la structure de l'espace est granulaire, cela devrait avoir un effet sur la propagation de la lumière. Des rayons de couleurs différentes qui traversent l'espace granulaire devraient en principe se déplacer à des vitesses très légèrement différentes (exactement comme dans un cristal : la lumière est dispersée et le rouge avance plus vite que le bleu : on voit donc arriver l'image rouge un peu avant l'image bleue). L'effet est infime, mais il s'accumule tout au long du trajet. On pourrait donc pouvoir le détecter sur les rayons de lumière venant de galaxies très lointaines. À l'heure actuelle, les mesures ne sont pas assez précises pour détecter une granularité inférieure à 10^{-29} cm. Or la théorie prévoit que la taille des « grains » d'espace est de l'ordre de 10^{-33} cm seulement. Il faut donc attendre d'avoir des instruments de mesure encore dix mille fois plus précis que ceux d'aujourd'hui pour pouvoir mettre cette prédiction à l'épreuve. Ce n'est pas hors de portée. Mais le vrai problème, c'est qu'il n'est pas du tout sûr que la théorie des boucles produise un tel effet qui, en fait, violerait une symétrie importante de la nature, que l'on appelle la « symétrie de Lorentz locale ». Au contraire, de nombreux arguments suggèrent que la théorie des boucles respecte cette symétrie, et les calculs plus

récents tendent à confirmer ce résultat, éloignant la possibilité que la théorie puisse être testée par cette voie.

Les conséquences de la théorie qui ont le plus de chance de devenir observables se trouvent dans un autre domaine : la cosmologie.

La cosmologie primordiale

La cosmologie a connu un développement impressionnant ces dernières décennies. Nous avons maintenant une connaissance considérable de l'histoire de l'Univers et de son expansion, et nous en apprenons toujours davantage. Ainsi, en 1998 nous avons découvert que l'Univers n'est pas seulement en expansion, mais que cette expansion est accélérée : l'Univers grandit de plus en plus vite. Cette expansion accélérée est souvent présentée sous les auspices d'une mystérieuse « énergie sombre », mais elle est très bien décrite par la théorie classique d'Einstein, si l'on tient compte d'un terme appelé « constante cosmologique ». Einstein avait déjà montré que ce terme entre dans les équations de la théorie, mais il n'avait pas été pris au sérieux jusqu'à la découverte de l'expansion accélérée. Le futur de l'Univers semble donc être, dans l'état actuel de nos connaissances, une expansion toujours accélérée et un éloignement perpétuel des galaxies les unes des autres.

C'est à l'autre extrémité de l'histoire que le mystère est le plus dense : au début. Et c'est là que la gravité quantique à boucles a quelque chose à offrir. L'application de la théorie des boucles à la cosmologie a connu un développement énorme ces dernières années et c'est l'un des domaines où la théorie engrange ses plus grands succès. Juste après le Big Bang, l'Univers était très petit ; on peut dire qu'il était seulement fait d'un très petit nombre de grains d'espace. Ces grains originels pourraient avoir laissé des traces dans la structure actuelle de l'Univers, notamment dans le fond de radiation cosmique (le fameux « rayonnement fossile ») qui a été très précisément mesuré, et qui est en train de nous dévoiler beaucoup de choses sur la structure de l'Univers. Il est impossible de modéliser l'évolution initiale de l'Univers par un espace continu, comme on le fait lorsque l'Univers est grand. Il faut prendre en compte la granularité de manière explicite, et, pour ce faire, on peut utiliser les équations de la théorie des *boucles*. De cette manière, on obtient une description des instants immédiatement postérieurs au Big Bang, et même du Big Bang lui-même.

La théorie des boucles nous donne donc un instrument possible pour étudier la cosmologie primordiale, le début de la vie de notre Univers. Les résultats sont assez surprenants. La relativité générale d'Einstein ne fonctionne plus quand on arrive au Big Bang, et donc sans une

théorie de la gravité quantique vous ne pouvez rien dire sur ce qui s'est passé au moment du Big Bang. Même les tentatives d'appliquer la mécanique quantique au problème n'ont pas donné de résultats satisfaisants. Par exemple, si vous essayez de calculer ce qui s'est passé dans l'Univers au moment du Big Bang en utilisant la vieille équation de Wheeler et DeWitt, vous retrouvez les mêmes incohérences que dans la théorie classique d'Einstein : l'évolution dans le temps s'arrête au Big Bang et les équations perdent tout leur sens. En revanche, si vous utilisez les équations qui viennent de la théorie des boucles, tout à coup les équations fonctionnent également pour le Big Bang. La raison en est précisément la granularité de l'espace. L'Univers se contracte de plus en plus à mesure qu'on se rapproche du Big Bang, mais il ne peut pas devenir arbitrairement petit, parce que dans la théorie des boucles il n'existe pas de volume arbitrairement petit : l'espace est quantifié.

Le premier qui a trouvé le moyen d'appliquer la théorie des boucles à la cosmologie était un jeune chercheur allemand : Martin Bojowald. Ses idées ont ensuite été développées par beaucoup, en particulier par lui-même et Abhay Ashetar avec son groupe de recherche aux États-Unis.

Les résultats assez surprenants de ce champ de recherche sont que, dans un certain sens, le Big Bang ne constitue pas un vrai début, mais pourrait être vu comme un « rebond » qui fait suite à une phase où l'Univers était en contraction.

Ce résultat est solide : il a été dérivé de différentes façons et en utilisant des modèles de complexité variable. Du point de vue théorique, la chose étonnante est que les équations ne deviennent plus insensées à l'approche du Big Bang. Elles ne donnent plus comme résultats des quantités infinies absurdes, il devient ainsi possible de calculer ce qui se passe au-delà du Big Bang.

Du point de vue de l'observation, ce résultat est de grande valeur, car les équations de l'évolution de l'Univers modifiées par la gravité quantique sont légèrement différentes de celles de la théorie classique habituellement utilisées par les cosmologistes. Cette différence pourrait avoir des effets détectables, en particulier dans l'observation du fond diffus cosmologique, cette faible lumière diffuse présente dans l'espace et étudiée par des satellites comme COBE, WMAP, et Planck. Avec ces nouveaux outils, on observe le fond de radiation cosmique avec une précision de plus en plus grande, et l'espoir augmente de pouvoir observer des effets calculables de la théorie des boucles.

Cependant, le travail de calcul qui relie les équations de base de la théorie à des observations éventuelles est tout sauf facile. Il implique des approximations, une vaste connaissance de la gravité quantique en

même temps que de la cosmologie, dont peu de gens disposent, et beaucoup d'intuition. Les meilleurs scientifiques du domaine qui travaillent dans cette direction se trouvent en France. Je pense en particulier à Aurélien Barrau, à Grenoble, qui est aujourd'hui à la pointe de cet effort de recherche et me semble extrêmement prometteur.

Du point de vue conceptuel, cependant, je reste un peu perplexe quant à la possibilité d'interpréter tous ces résultats simplement en termes d'un univers « avant » le Big Bang. Les résultats théoriques sont justes, et les observations qui pourraient en être dérivées sont concrètes, mais la signification physique précise de ces découvertes est encore, à mon avis, un grand mystère à élucider. En particulier, est-ce qu'il y a vraiment du sens à se demander ce qui s'est passé « avant » le Big Bang ?

Ce que la théorie nous dit, c'est qu'aux alentours du Big Bang, l'Univers se trouve dans un état quantique tel que le temps et l'espace ne sont pas bien définis, tout comme dans la mécanique quantique la trajectoire d'une particule n'est pas bien définie. Mais si l'espace et le temps ne sont pas définis dans cette zone de l'espace-temps, que signifie encore l'expression « avant » ?

Finalement, qu'est-ce que le temps dans une théorie où l'espace-temps lui-même devient probabiliste ?

Le Temps n'existe pas

Jusqu'ici, je n'ai parlé que de l'espace. Le moment est venu de parler plus sérieusement du temps.

Environ dix ans avant de découvrir la théorie de la relativité générale, Einstein avait déjà compris que le temps et l'espace ne sont pas deux entités séparées, mais plutôt deux aspects d'une même entité. Cette découverte porte le nom de relativité restreinte. Plus précisément, la découverte d'Einstein est la suivante. Nous avons l'habitude de penser que deux événements (l'arrivée de Christophe Colomb en Amérique et la mort de John Lennon par exemple) sont toujours ordonnés dans le temps, c'est-à-dire que l'un se produit *avant* et que l'autre se produit *après*. Nous avons l'habitude de penser que le temps est quelque chose d'universel, et que pour cette raison il y a un sens à se demander ce qui se passe *en ce moment précis* dans un autre endroit de l'Univers.

Mais Einstein a compris que ce n'était pas le cas.

La relativité du Temps

L'illustration la plus frappante de la relativité du temps est appelée le paradoxe des jumeaux. Deux jumeaux voyagent à grande vitesse en s'éloignant l'un de l'autre, et lorsqu'ils se retrouvent ils ont des âges différents. On parle de paradoxe, mais il ne s'agit pas d'un paradoxe. C'est simplement une conséquence de la façon dont le monde est structuré. Le seul aspect paradoxal est que nous n'avons pas l'habitude d'observer ces phénomènes et qu'ils nous paraissent donc étranges. Mais c'est ainsi. Des expériences précises ont été réalisées (pas avec des jumeaux, mais avec des horloges identiques très précises embarquées dans des avions rapides) et il a été chaque fois vérifié que le monde fonctionne exactement comme Einstein l'a compris : les deux horloges affichent des heures différentes lorsqu'on les rassemble.

(À ce propos, il y a eu récemment en France une polémique sur la paternité de la relativité restreinte : revient-elle à Einstein ou à Poincaré ? La contribution de Poincaré a été en effet trop négligée. Mais en lisant les articles originaux, il me semble clair que le fait fondamental que deux horloges identiques mesurent des temps différents quand elles sont en mouvement a été compris par Einstein, et non par Poincaré.)

Le temps devient encore plus variable avec la théorie de la relativité générale. Un champ gravitationnel plus fort (au voisinage de la Terre, ou du Soleil, par exemple) fait fonctionner les horloges plus lentement. C'est d'ailleurs là la raison des corrections relativistes qu'il faut introduire dans le fonctionnement du GPS. Le GPS est basé sur la mesure très précise du temps de parcours de signaux entre la Terre et des satellites en orbite. Ceux-ci se déplacent à grande vitesse, et en plus ils sont un peu plus à l'extérieur du champ de gravité terrestre que nous. Donc leur temps n'est pas exactement le même qu'au sol : il s'écoule un tout petit peu plus lentement. Si l'on ne corrige pas les calculs des distances, en tenant compte de cette différence, le résultat sera totalement faux.

Pour la petite histoire, la réalité de ces phénomènes est tellement contraire à notre intuition que lors du développement du système GPS, les généraux de l'armée américaine ont eu du mal à y croire. Les physiciens leur avaient dit que les horloges embarquées dans les satellites fonctionneraient moins vite que les horloges au sol, mais... pouvait-on prendre ça au sérieux ? Un général de l'armée peut-il vraiment croire que le temps s'écoule plus vite ou plus lentement ? Pour être sûre, l'armée américaine a testé le système avec les deux options : une sans correction et une avec correction. Et que croyez-vous qu'il arriva ? Voilà un exemple précis du sens dans lequel la relativité générale est une théorie *établie*. Ne pas croire à ce genre de prédictions est une idiotie.

Revenons-en aux principes. Ce qu'il faut comprendre pour commencer, c'est que lorsque deux événements se déroulent en des endroits suffisamment éloignés, il n'y a pas de sens, en général, à dire lequel des deux arrive *le premier*. Et il n'y a pas de sens non plus à demander ce qui arrive *en ce moment précis* dans la galaxie d'Andromède, par exemple. La raison en est que le temps ne s'écoule pas partout de la même manière. Nous avons notre temps, et la galaxie d'Andromède a le sien, et de manière générale ces deux temps ne peuvent pas être mis en relation.

La seule chose qu'on puisse faire, c'est échanger des signaux, mais ceux-ci vont prendre des millions d'années pour faire l'aller-retour entre ici et Andromède. Imaginez un extraterrestre qui nous envoie un signal depuis Andromède. Nous recevons ce message *aujourd'hui* et nous y répondons immédiatement. Nous pouvons dire que le moment où l'extraterrestre a envoyé le signal se place *avant* aujourd'hui, et que le moment où il recevra la réponse viendra *après* aujourd'hui. Mais pendant les millions d'années qui s'écoulent entre l'envoi du signal par l'extraterrestre et sa réception de notre réponse, il n'existe pas de moment particulier sur Andromède qui corresponde à cet « aujourd'hui » sur la Terre.

Tout cela pour dire que nous ne devons pas penser au temps comme s'il existait une horloge cosmique rythmant la vie de l'univers. Nous devons y penser comme à quelque chose de local : chaque objet dans l'univers possède son propre temps. La façon dont les temps de chacun s'articulent lorsque des objets se rencontrent ou échangent des signaux peut être décrite précisément. Mais pour le faire, dans la description mathématique du monde, on ne parle pas de « temps » et d'« espace », mais d'une union des deux appelée « espace-temps ».

Nous savons ces choses depuis plus d'un siècle (le texte d'Einstein qui a expliqué tout ceci a été publié en 1905). Il n'est pas tellement étonnant que quelque chose que nous savons depuis un siècle ne soit pas encore devenu une connaissance répandue et connue de tous. La même chose s'est produite pour beaucoup de révolutions conceptuelles, comme la révolution copernicienne. Très longtemps après la découverte de Copernic, beaucoup de gens étaient toujours convaincus que le Soleil tournait autour de la Terre et non l'inverse. Par ailleurs, la recherche continue et n'attend pas à chaque étape que tout le monde suive de près.

L'absence du Temps

Aujourd'hui, la nouveauté qui nous vient de la gravitation quantique est que l'espace n'existe pas. Seul le champ gravitationnel existe qui, comme je l'ai dit, est fait de nuages de probabilités de grains reliés en réseau. Mais en combinant cette idée avec la relativité restreinte, on doit conclure que la non-existence de l'espace implique aussi la non-existence du temps. En effet, c'est exactement ce qui se passe en gravité quantique : la variable t ne figure pas dans l'équation de Wheeler-DeWitt, ni ailleurs, dans la structure de base de la théorie.

Le temps n'existe pas. Il faut apprendre à penser le monde en termes non temporels, bien que ce soit difficile au niveau intuitif, car nous sommes habitués à nous représenter le temps comme quelque chose en soi, qui s'écoule.

Que signifie cette idée que le temps n'existe pas ?

Le temps intervient dans toutes ou presque toutes les équations de la physique classique. C'est la variable symbolisée par la lettre t . Les équations nous disent comment les choses changent au cours du temps et nous permettent de prédire ce qui va se produire dans un moment à venir si nous connaissons ce qui s'est produit dans le passé. Plus précisément, nous mesurons des variables, par exemple la position A d'un objet, l'amplitude B d'un pendule oscillant, la température C d'un corps, etc., et les équations nous disent comment les variables A , B et C changent au cours du temps. C'est-à-dire qu'elles expriment les

fonctions $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, etc., qui décrivent le changement de ces variables au cours du temps (t).

Galilée fut le premier à comprendre que le mouvement des objets sur la Terre pouvait être décrit par des équations exprimées en fonction de la variable temps $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ et à écrire ces équations. Son travail se plaçait dans le prolongement d'une réflexion inaugurée par les idées de Copernic. Il fut l'un des premiers à prendre très au sérieux l'idée que la Terre bouge et à en tirer une intuition de génie. On savait, par l'astronomie, qu'il existait des lois exactes régissant le mouvement des corps dans le ciel. Mais si la Terre bougeait, elle était un objet parmi d'autres dans le ciel. Donc, il devait aussi y avoir des lois qui régissaient le mouvement des corps sur la Terre. Il les a cherchées. Et il les a trouvées.

La première loi physique terrestre trouvée par Galilée décrit comment les choses tombent. C'est simple : la distance x parcourue par un objet qui tombe est proportionnelle au carré du temps « t ». C'est-à-dire : dans un temps double, un objet parcourt une distance quatre fois plus grande. Cela s'écrit en général sous la forme $x = (1/2)at^2$, où a est un nombre (l'accélération) et le « $1/2$ » est là pour des raisons historiques. Galilée a trouvé cette loi empiriquement en étudiant comment une bille se meut lorsqu'elle descend le long d'un plan incliné. Pour découvrir et confirmer cette loi, Galilée avait besoin de deux mesures : celle de la position x de la bille le long du plan incliné, et celle du temps t . Il avait donc besoin, en particulier, d'un instrument pour mesurer le temps t , c'est-à-dire d'une horloge.

À l'époque où est né Galilée, il n'y avait pas d'horloges précises, mais Galilée lui-même, dans sa jeunesse, a découvert une façon d'en construire une. Il s'est aperçu que les oscillations d'un même *pendule*, qu'elles soient grandes ou petites, ont toujours la même durée. On pouvait donc mesurer le temps simplement en comptant les oscillations d'un pendule. La variable « t » qui représente le temps, n'est rien d'autre que le nombre d'oscillations du pendule. L'idée semble évidente, et pourtant il a fallu attendre Galilée. Personne n'y avait pensé avant lui. C'est cela, l'esprit scientifique.

Mais les choses ne sont pas tout à fait aussi simples. La légende dit que Galilée eut cette intuition dans la magnifique cathédrale de Pise, pendant qu'il observait les lentes oscillations d'un chandelier suspendu, qui s'y trouve d'ailleurs toujours aujourd'hui (l'histoire est fautive, puisque le chandelier n'a été suspendu que de nombreuses années après la découverte de Galilée, mais c'est une belle histoire). Galilée observait les oscillations du chandelier pendant un service religieux, qui ne devait pas l'intéresser beaucoup, et il a compté le nombre de ses battements cardiaques. Il découvrit avec excitation qu'il

y avait un nombre égal de battements pendant chaque oscillation. Il en conclut donc que toutes les oscillations avaient la même durée.

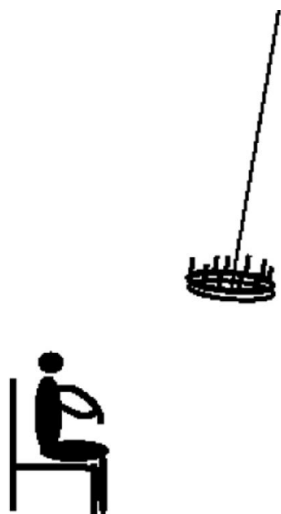


Fig. 6.1 Galilée découvre que les oscillations d'un pendule ont la même durée, en comptant les battements de son pouls durant les lentes oscillations du chandelier de la cathédrale de Pise.

Aujourd'hui, l'histoire paraît belle, mais si l'on y réfléchit un peu plus attentivement, on restera perplexe, et cette perplexité est à la base même du problème du temps. Car comment Galilée pouvait-il savoir que ses battements cardiaques avaient tous la même durée ? Quelques années plus tard, les médecins ont commencé à mesurer le pouls de leurs patients en utilisant une horloge qui n'était rien d'autre qu'un pendule. On utilise donc le pouls pour être sûr que le pendule est régulier, et le pendule pour être sûr que le pouls est régulier. N'est-ce pas un cercle vicieux ? Qu'est-ce que cela signifie ?

Cela signifie que nous ne mesurons *jamais* le temps lui-même. Nous mesurons toujours des variables physiques A , B , C ... (oscillations, battements, et bien d'autres choses), et nous comparons toujours une variable avec une autre. Donc, nous mesurons les fonctions $A(B)$, $B(C)$, $C(A)$, etc. Et pourtant, il est utile d'imaginer qu'il existe une variable t , le « vrai temps », que nous ne pouvons jamais mesurer, mais qui se trouve derrière toute chose. Nous écrivons toutes les équations pour les variables physiques en fonction de ce t inobservable. Ces équations nous disent comment les choses changent en fonction de t (combien de temps les oscillations durent, et combien de temps prend chaque battement de cœur). De là, nous calculons comment les variables changent l'une par rapport à l'autre (combien de battements de cœur dans une oscillation) et nous comparons cette prédiction avec ce que

nous observons. Si la prédiction est correcte, nous concluons que ce schéma compliqué est le bon, et en particulier qu'il est utile d'utiliser la variable t , même si nous ne pouvons jamais la mesurer directement. En d'autres termes, l'existence de la variable temps est une supposition plus que le résultat d'une observation.

Newton a compris que c'était la chose à faire, et il a formalisé et institué cette démarche. Newton affirme explicitement que nous ne pouvons pas mesurer le « vrai » temps t , mais que si nous supposons qu'il existe, cela nous permet de construire un schéma extrêmement efficace pour comprendre et décrire la nature.

Revenons maintenant à notre époque, à la gravitation quantique, et à la signification de cette assertion : « le temps n'existe pas ». La signification en est simplement que le schéma de Newton ne fonctionne plus quand nous parlons de l'infiniment petit. C'était un bon schéma, mais il est valable seulement pour les phénomènes macroscopiques, c'est-à-dire à notre échelle.

Si nous voulons comprendre le monde de façon plus large, si nous voulons le comprendre aussi dans des régimes qui nous sont moins familiers, il faut abandonner ce schéma, car il n'est plus valable. En particulier, l'idée d'un temps t qui s'écoule de lui-même, et par rapport auquel tout le reste évolue, n'est plus une idée efficace. Le monde ne peut pas être décrit par des équations d'évolution dans le temps t .

Quand un étudiant en physique est confronté pour la première fois à cette idée, il commence à paniquer. Des équations sans la variable temps ? Mais comment pourra-t-on décrire l'évolution du système ? Petit à petit il comprendra que la variable temps n'est pas vraiment nécessaire. Plutôt que de tout rapporter au « temps », abstrait et absolu, ce qui était un « truc » inventé par Newton, on peut décrire chaque variable en fonction de l'état des autres variables.

Pour cela, nous devons nous restreindre à des listes de variables A , B , C ... que nous observons *effectivement*, et établir des relations entre ces variables, c'est-à-dire des équations pour les fonctions $A(B)$, $B(C)$, $C(A)$... que nous observons, et non pour les fonctions $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, que nous n'observons *pas*. Dans l'exemple, nous n'aurons pas le poulx et le pendule qui tous les deux évoluent dans le temps, mais seulement des équations qui nous disent comment l'un et l'autre évoluent par rapport à l'autre. Quelles valeurs de l'un sont compatibles avec quelles valeurs de l'autre.

Tout comme l'espace, le temps devient une notion relationnelle. Il n'exprime qu'une relation entre les différents états des choses.

Il s'agit d'un changement simple, mais sur le plan conceptuel c'est un pas de géant. Nous devons apprendre à penser le monde non comme quelque chose qui évolue dans le temps, mais d'une autre façon. Au

niveau fondamental, il n'y a pas de temps.

La nouvelle image du monde qui est en train de se mettre en place dans la physique de base est celle d'un monde sans espace et sans temps. L'espace et le temps usuels vont tout simplement *disparaître* du cadre de la physique de base, de la même façon que la notion de « centre de l'univers » a disparu de l'image scientifique du monde.

Est-ce qu'on peut vraiment penser le monde d'une façon complètement atemporelle ? Est-ce qu'on peut vraiment penser le monde, *ce* monde, d'une façon qui ne fait pas intervenir le temps ? Je pense que oui, mais c'est une révolution radicale dans la structure de notre pensée.

Alain Connes

Une partie importante de mon travail a consisté à étudier les problèmes techniques et conceptuels soulevés par la gravitation quantique, dans le but d'obtenir une théorie sans la variable temps et de comprendre ce que cela signifiait. L'un de ces problèmes est le suivant : si le temps n'existe pas au niveau fondamental, qu'en est-il du temps que nous percevons, nous, comme du temps qui s'écoule ; qu'est-ce que cela peut être ? Vers la fin des années quatre-vingt-dix, j'ai travaillé sur une idée de solution possible à ce problème. Cette idée a eu un effet important sur ma vie : elle m'a ramené en Europe, au terme du parcours intellectuel suivant.

Le monde est compliqué : il y a des milliards de particules et encore plus de variables qui décrivent les champs. Nous avons rarement la maîtrise de toutes les variables d'un problème. Quand nous avons ce contrôle, nous pouvons vérifier que le système est gouverné par des équations dynamiques ; et au niveau fondamental, comme nous l'avons vu, le temps n'apparaît pas dans ces équations. Mais, dans la plupart des cas, nous ne mesurons qu'une toute petite partie des innombrables variables qui caractérisent un système. Par exemple, si nous étudions un morceau de métal à une certaine température, nous pouvons mesurer sa température, sa longueur, sa position, mais pas les mouvements microscopiques de chacun de ses atomes qui, nous le savons, sont à l'origine de la température. Dans de tels cas, nous utilisons non seulement les équations de la dynamique pour décrire la physique du système, mais également celles de la mécanique statistique et de la thermodynamique. Celles-ci sont des équations statistiques qui nous permettent de faire des prédictions, même si nous ne connaissons pas les mouvements exacts de toutes les variables microscopiques.

L'idée qui nous permet de retrouver un temps macroscopique à partir d'une théorie fondamentale atemporelle est que le temps apparaît

seulement dans ce contexte statistique thermodynamique. Une autre façon de le dire est que *le temps est un effet de notre ignorance* des détails du monde. Si nous connaissions parfaitement tous les détails du monde, nous n'aurions pas la sensation de l'écoulement du temps. J'ai beaucoup travaillé sur cette idée et sur l'idée mathématique qui la soutient ; celle-ci doit montrer comment des phénomènes typiques liés au passage du temps peuvent émerger d'un monde atemporel, lorsque nous en avons une connaissance limitée. La communauté scientifique a réagi à cette idée avec perplexité, et mon travail dans cette direction a été pendant longtemps assez largement ignoré.

Un jour, je me suis trouvé à l'Institut Newton de Cambridge, en Angleterre, l'une de ces institutions magnifiques où les scientifiques du monde entier sont invités dans le seul but de rencontrer leurs collègues et d'échanger des idées. Mais l'atmosphère légèrement prétentieuse qui règne à Cambridge ne me plaisait pas plus que ça et je commençais à trouver que je perdais mon temps, quand un soir je me suis retrouvé à table à côté d'une personnalité extraordinaire : Alain Connes.

Alain est l'un des plus grands mathématiciens vivants. Il a reçu les plus importantes récompenses internationales dans sa discipline. Quand nous avons commencé à discuter, j'ai découvert un homme avec l'enthousiasme et la passion d'un jeune garçon, avec une intelligence étonnante, et un volcan d'idées, non seulement en mathématiques mais aussi en physique, domaine dans lequel il a obtenu des résultats surprenants.

Nous étions assis côte à côte par hasard, pour un dîner, dans l'atmosphère un peu rigide et ennuyeuse de Cambridge, et nous avons engagé une conversation sur ceci puis sur cela. Nous avons bu quelques verres de vin. En passant, Alain a lancé cette phrase : « J'ai une idée sur la façon dont le temps émerge, mais personne ne l'a prise au sérieux ». J'ai dressé l'oreille et je lui ai demandé des détails. J'ai dû insister, car il n'était pas trop d'humeur à entrer dans les questions techniques, mais finalement il a commencé à m'expliquer son idée, en dessinant des diagrammes sur une serviette avec sa fourchette et en lançant des miettes de pain en l'air pour illustrer son propos. Après un moment de flou, j'ai compris que l'idée qu'il m'expliquait était exactement celle sur laquelle j'avais travaillé. Je suis monté dans ma chambre, et je suis redescendu avec mes travaux publiés sur le sujet. Nous avons utilisé des mathématiques très différentes, mais Alain comprit rapidement que les miennes n'étaient qu'un cas particulier des siennes.

Quand un scientifique formule une idée, il tend généralement à croire qu'elle est correcte. Si personne d'autre n'approuve, il continuera

souvent à croire qu'il a raison et que les autres ont tort... mais il aura quelques doutes. S'il découvre que quelqu'un d'autre a trouvé la même idée indépendamment de lui, la tentation de croire que « nous » avons raison et que les autres « ne comprennent rien » devient irrésistible...

Donc, Alain et moi avons publié un article illustrant cette idée, en rassemblant les aspects qu'il avait compris et ceux que j'avais compris. Et j'ai trouvé en Alain un nouvel ami – un ami formidable, doté d'une passion intellectuelle et d'une intelligence uniques.

Le monde scientifique fonctionne un peu comme la Cour du Roi Soleil : il suffit d'avoir été un moment près du Roi pour que beaucoup de portes s'ouvrent comme par miracle. J'avais vécu dix ans aux États-Unis, et je commençais à en avoir assez. J'avais très envie de rentrer en Europe et je l'ai fait savoir. La collaboration avec Alain fut à cet égard providentielle. Alain est un roi un peu anarchique, mais un roi quand même. Quelques mois après la parution de notre travail, j'ai reçu un coup de téléphone du Centre de Physique Théorique de Luminy, à Marseille, me demandant si j'étais prêt à venir travailler chez eux.

Retour en Europe

Cette fois, j'ai hésité moins longtemps que, dix ans plus tôt, pour le voyage vers les États-Unis.

Quitter l'Amérique avait son prix. Par-dessus tout, j'ai regretté la présence quotidienne de mes collègues de Pittsburgh, et en particulier celle de Ted Newman, un très grand scientifique (c'est lui qui a trouvé la description la plus générale des trous noirs, par exemple), mais surtout un caractère intensément humain, foncièrement honnête, capable d'observer et de comprendre les autres en profondeur, et de sourire en toutes circonstances. C'était Ted qui, lorsque j'étais irrité par le comportement de tel ou tel, venait dans mon bureau, se laissait tomber sur une chaise (il a le physique et le comportement d'un gros ours) et me souriait d'une manière si douce et ironique que toute ma colère s'évanouissait. Ted a représenté pour moi un modèle à suivre, une affection sûre et un point de référence.

De plus, il fallait quitter les précieux abords du Center for the History and Philosophy of Science. Et puis, il fallait quitter aussi la simplicité directe des Américains, leur confiance en l'homme, leur volonté d'agir, bien différentes des pièges et des obstacles qui rendent tout si lent et compliqué en Europe, où tout semble comme enlisé dans du sirop. Il y a beaucoup à apprendre aux États-Unis pour un Européen, et l'on peut y réussir des choses qui seraient difficiles en Europe. Aux jeunes prometteurs, l'Amérique offre des ponts d'or, là où l'Europe leur dit

d'attendre patiemment leur tour. Il est possible que, sans les perspectives qui m'ont été offertes aux États-Unis, je n'aurais pas réussi à rester actif dans le domaine de la science.

Il n'empêche que, pour un Européen, vivre aux États-Unis est difficile. Les relations humaines sont différentes. Les valeurs sont différentes. De trop nombreux aspects de la culture américaine sont intolérables : l'extrême violence urbaine, les tensions raciales, la peine de mort, l'absence d'assistance médicale et de sécurité sociale pour tous, l'abandon des plus faibles et des plus pauvres à leur sort, l'arrogance de l'argent et du pouvoir. L'idée même de justice sociale est presque opposée à celle que nous connaissons en Europe. Aux États-Unis, la justice sociale signifie que chacun, *s'il a des capacités*, peut arriver au sommet, indépendamment de son origine. En Europe, au contraire, la justice sociale suppose la défense des faibles, donc en particulier de ceux qui *n'ont pas de capacités* particulières. Et la politique étrangère américaine est insupportable. L'hypocrisie avec laquelle l'idéologie de la liberté et de la démocratie couvre l'agressivité impériale et la certitude de la supériorité américaine est transparente. Peut-être est-ce aussi l'envie pour le pouvoir que l'Europe a perdu, ou parce nous y voyons réfléchis les horreurs de nos crimes passés, mais la violence continue de l'agressivité extérieure américaine nous éloigne. La majorité des Européens qui vont vivre aux États-Unis ressentent fortement, après peut-être une période d'enthousiasme, la nostalgie pour l'âme aujourd'hui plus apaisée et généreuse de l'Europe.

De plus, les temps commençaient à changer, et déjà on voyait s'installer l'atmosphère de peur, de pessimisme et de fanatisme qui aujourd'hui recouvre malheureusement comme un voile noir plusieurs aspects de la vie civile aux États-Unis. Il était temps de repartir.

Lors de ma première visite à Marseille, j'ai été ébloui par la lumière, le soleil, le vert cristallin de la mer, le charme méditerranéen, ancien mais intemporel, l'extraordinaire mélange de peuples de cette vieille cité française, et j'en suis tombé amoureux immédiatement. Le Centre de Physique Théorique de Luminy, à l'Université de la Méditerranée, où je travaille aujourd'hui, se trouve un peu en dehors de la ville, près de la mer, dans un environnement naturel rude et splendide. C'est un endroit idéal pour étudier. J'habite près de la mer. J'ai réparé un petit bateau de pêcheur en bois vieux d'un siècle, un « pointu », j'ai fait reconstruire sa vieille voile latine, et lorsque je ne travaille pas, je navigue sous les rochers blancs et sauvages où volent les goélands.



Fig. 6.2 *Sur mon grand navire.*

Les boucles, les cordes et les autres

La théorie des boucles aujourd'hui

Je travaille en France depuis plus de dix ans, et je suis très reconnaissant à ce pays de m'avoir donné l'occasion de poursuivre mes recherches. Pendant ces dix années, la communauté des chercheurs qui travaillent sur les boucles s'est beaucoup agrandie. Rien qu'en France, aujourd'hui des groupes travaillent sur cette théorie à Marseille, Orsay, Paris, Lyon, Tours, Montpellier et Grenoble. En 2004, Marc Knecht, le directeur de mon laboratoire de recherche, le CPT de Marseille, a réussi à me convaincre, malgré mes fortes réticences initiales, d'organiser une conférence entièrement consacrée à la théorie des boucles. Ce que je fis, avec deux collègues français, Laurent Friedel, de Lyon, qui est ensuite parti au Canada, et Philippe Roche, de Montpellier, qui s'est occupé des boucles pendant un temps, et travaille maintenant sur d'autres choses. La conférence a eu un succès que je n'espérais pas, et a donné lieu à une série de conférences internationales qui se sont tenues dans divers pays européens, et aussi au Mexique et en Chine, événements qui ont attiré des centaines de chercheurs, la plupart très jeunes.

Grâce à tous ces efforts, la théorie a continué à croître, à se clarifier, à devenir plus solide et plus simple. La version la plus ancienne de la théorie, qui est toujours étudiée, notamment en Allemagne, est basée sur une séparation stricte au départ entre les aspects spatiaux et les aspects temporels de l'espace-temps. La version plus récente, développée principalement en France, au Canada et en Grande-Bretagne, est plutôt une version « covariante », où les aspects spatiaux et temporels sont traités sur un mode plus uniforme. La différence est la même que celle qui existe entre les deux formulations standard de la mécanique quantique : le « Hamiltonien » basé sur les équations de Schrödinger, et la « covariance » développée par le grand physicien Richard Feynman dans les années cinquante. En ce moment, je travaille sur cette version covariante « à la Feynman » de la théorie.

Dans cette version, pour calculer les effets physiques, il faut calculer la « probabilité de transition », c'est-à-dire la probabilité d'observer quelque chose si quelque chose d'autre a déjà été observé. Suivant la

recette de Feynman, cette probabilité de transition se calcule dans la théorie en faisant la somme de toutes les « histoires » possibles. En gravité quantique, les « histoires » qu'il faut additionner sont les diverses configurations du champ gravitationnel, c'est-à-dire les diverses configurations de l'espace-temps.

Mais peut-on parler de l'espace-temps, si le temps n'existe pas ? Oui, c'est possible dans le champ des calculs « à la Feynman ». Tout d'abord, l'inexistence du temps dans les équations fondamentales de la théorie n'empêche pas que nous puissions faire des prédictions précises. Par exemple, au lieu de prédire la position d'un objet qui tombe « au bout de cinq secondes », nous pouvons prédire sa chute « après cinq oscillations du pendule ». La différence est faible en pratique, mais grande d'un point de vue conceptuel, car cette démarche nous libère de toute contrainte sur les formes possibles de l'espace-temps.

Comme on peut continuer à parler d'« espace », pour les réseaux de spin, même s'il s'agit de quelque chose de très éloigné de notre vieille idée d'espace, de la même façon nous pouvons continuer à parler d'« espace-temps » pour indiquer la façon dont les réseaux de spin se transforment l'un en l'autre, c'est-à-dire pour décrire les « histoires » de l'évolution des réseaux de spin.

Rappelez-vous qu'en mécanique quantique, on ne fait que des prédictions probabilistes. Par exemple, si nous avons vu une particule au point A, nous pouvons calculer la probabilité de trouver la particule au point B. La façon efficace de faire ce calcul, développée par Feynman, est d'imaginer que *toutes* les trajectoires possibles de A à B pèsent sur la probabilité finale. C'est un peu comme si la particule suivait toutes les trajectoires à la fois. En fait, ce n'est qu'une autre façon de dire que la particule se délocalise dans un nuage de probabilités.

Or, cette même idée peut être utilisée pour calculer la dynamique du champ gravitationnel quantique. Quelle est la probabilité de voir un réseau de spin B, si nous venons de voir un réseau de spin A ? Toutes les histoires possibles de A à B pèseront dans la probabilité finale. Chacune de ces histoires peut être interprétée comme un morceau d'espace-temps. C'est un peu comme si d'innombrables espaces-temps différents étaient tous présents à la fois.

Chaque « histoire de réseaux de spin » s'appelle une *spinfoam* ou « mousse de spin ». La raison de ce nom est la suivante. Imaginez une mousse. Imaginez que vous la congélez et que vous la coupez avec un couteau très fin. Si vous réfléchissez un moment vous voyez bien que la section de mousse coupée est en fait un réseau : la section de chaque surface de la mousse donne un lien, et la section des lignes où

les surfaces s'unissent donne un nœud du réseau. Si vous coupez la mousse en tranches très fines, vous obtenez donc une suite de réseaux. En d'autres mots : une mousse peut être vue comme une succession, c'est-à-dire une histoire de réseaux. Les espaces-temps formés par les « histoires de réseaux de spin » sont donc des mousses de spin.

La description de la théorie des boucles faite en termes de ces mousses de spin est aujourd'hui une des directions de recherche les plus actives, poussée surtout par de brillants jeunes chercheurs travaillant en France, comme Etera Livine à Lyon, Alejandro Perez, Simone Speziale et Eugenio Bianchi à Marseille ou Karim Noui à Tours.

Ces dernières années, une formulation très simple de l'« amplitude » d'une mousse de spin, c'est-à-dire de sa contribution à la probabilité de transition totale, a été trouvée de façon indépendante par des groupes de recherche différents en France et au Canada, tandis que des groupes de recherche anglais, à Nottingham, ont montré que cette amplitude était bien cohérente avec la théorie de la relativité générale d'Einstein.

Grâce à ces développements, la théorie n'est plus très loin d'être complète, et mon enthousiasme à l'idée de tenir une théorie de gravité quantique dans les mains est difficile à contenir.

Cela dit, je ne sais pas si la théorie est vraiment complète, et surtout je ne sais pas si elle est correcte, c'est-à-dire si elle décrit réellement la nature.

Les cordes et les autres

À côté de la théorie des boucles, en effet, il existe aujourd'hui au moins une autre théorie bien développée de la gravitation quantique : la « théorie des cordes ». Celle-ci suppose que les particules élémentaires ne sont pas des particules, mais de petites cordes. Bien qu'il y ait un air de famille entre les *cordes* et les *boucles*, la différence est énorme : les cordes sont de petits segments qui bougent *dans* l'espace, tandis que les *boucles sont* elles-mêmes l'espace.

La théorie des cordes est beaucoup plus ambitieuse que la théorie des boucles : en plus de chercher une solution possible au problème de la gravitation quantique, c'est une théorie qui tente d'unifier toutes les forces et toutes les particules de la physique. Elle se propose non seulement de réconcilier mécanique quantique et relativité générale, mais également d'unifier toutes les interactions fondamentales de la physique. De trouver la « théorie finale du tout ». J'ai le sentiment que cet objectif est excessif, ou prématuré, mais il est possible que je me trompe.

Dans leur façon d'aborder le problème de la gravitation quantique

proprement dit, la théorie des cordes et la théorie des boucles ne diffèrent pas seulement parce qu'elles explorent des hypothèses physiques différentes, mais aussi parce qu'elles sont le produit de deux communautés de scientifiques, qui ont des présupposés bien distincts, et qui voient le problème de la gravitation quantique sous des angles différents.

La première de ces deux communautés est celle des physiciens des hautes énergies, ceux qui sont familiers de la théorie des champs quantiques (c'est-à-dire l'application de la mécanique quantique aux champs), et du « modèle standard » des particules, la théorie actuelle qui décrit le mieux tous les événements du monde physique, à l'exception des phénomènes gravitationnels. C'est une théorie qui n'a jamais été prise en défaut par aucune expérience. Du point de vue d'un physicien des hautes énergies, la gravitation est simplement la dernière et la plus faible des interactions connues. Il est donc naturel qu'il essaie de comprendre ses propriétés quantiques en utilisant la stratégie qui s'est montrée gagnante dans le reste de la microphysique. La recherche d'une théorie de champ quantique conventionnelle, capable d'englober la gravitation, s'est développée pendant plusieurs décennies et, après de nombreux rebondissements, moments d'enthousiasme et déconvenues sévères, a conduit à la théorie des cordes. Les fondements de la théorie des cordes ne sont pas encore bien compris, mais elle est aujourd'hui la théorie candidate à la gravitation quantique la plus connue et la plus largement étudiée.

Dans la théorie des cordes, la gravitation réside simplement dans les excitations d'une corde plongée dans un espace. La présence d'un tel espace de référence, sur lequel la théorie est définie, est indispensable pour la formulation et l'interprétation de la théorie. Il s'agit d'un espace fixe, classique, newtonien – dont on sait qu'il ne correspond pas à la réalité. L'espace *doit* être quantique. Mais tout se passe dans la théorie comme si on oubliait que l'espace devait avoir des propriétés quantiques : on laisse ce problème pour plus tard. En outre, pour fonctionner, la théorie des cordes a besoin d'un espace à dix dimensions ainsi que de particules supersymétriques, autant d'hypothèses très fortes et sans le moindre début de confirmation expérimentale à ce jour. On ne voit pas très bien comment une théorie à dix dimensions avec des particules supersymétriques inconnues pourra être utilisée concrètement pour déduire des prédictions univoques, compréhensibles et applicables au monde où nous vivons, sans supersymétrie, et dont les dimensions de l'espace sont au nombre de trois.

La deuxième communauté est celle des spécialistes de la relativité générale. Pour un relativiste, l'idée d'une description fondamentale de la gravitation en termes d'excitations physiques dans un espace de

référence sonne « faux ». La leçon première que nous a enseignée la relativité générale est qu'il n'y a *pas* d'espace *dans lequel* la physique puisse se dérouler (sauf, bien sûr, dans une approche approximative). Le monde est plus compliqué. Pour un relativiste, la relativité générale est bien plus qu'une théorie du champ pour une force particulière. C'est, plus fondamentalement, la découverte du fait que certaines notions classiques concernant le temps et l'espace sont complètement inadaptées au niveau fondamental ; elles demandent des transformations aussi profondes que celles que la mécanique quantique a introduites. L'une de ces notions caduques est précisément celle d'espace de référence, qu'il soit euclidien ou courbe, dans lequel la physique prendrait place. C'est en y renonçant qu'on a pu comprendre la gravitation relativiste, découvrir les trous noirs, l'astrophysique relativiste et la cosmologie moderne.

Donc, pour un relativiste, le problème de la gravitation quantique réclame que la vaste révolution conceptuelle commencée avec la mécanique quantique et la relativité générale trouve sa conclusion dans une nouvelle synthèse. Dans celle-ci, les notions d'espace et de temps doivent être entièrement refondues pour prendre en compte ce que nous avons appris de nos deux théories « fondamentales » actuelles.

À l'inverse de la théorie des cordes, la théorie des boucles est formulée sans espace de référence. Elle est donc une véritable tentative de saisir la nature de l'espace-temps quantique au niveau fondamental. En conséquence, la notion d'espace-temps qui émerge de la théorie est radicalement différente de celle sur laquelle sont basées la mécanique quantique conventionnelle ou la théorie des cordes. Dans les équations de la gravitation quantique à boucles n'apparaissent nulle part la variable t (le temps) ni la variable x (la position), et pourtant ces équations sont parfaitement capables de prédire l'évolution d'un système. En outre, elles ne supposent ni dimensions supplémentaires ni toutes les particules exotiques prévues par la théorie des cordes et jamais observées.

Si la théorie des cordes est plus étudiée et plus connue que la théorie des boucles, c'est essentiellement pour des raisons historiques. Cette situation reflète la physique du XX^e siècle, dans laquelle la relativité générale est restée marginale. Parce qu'elle était très compliquée et, en pratique, ne servait à rien, cette théorie est restée confinée dans une petite communauté de physiciens, très considérée, mais dont les travaux restaient confidentiels. En revanche, la mécanique quantique a connu un énorme développement grâce au nombre de ses applications pratiques (les lasers, la matière condensée, les particules, la physique nucléaire, la bombe atomique...) Quand le problème de la gravitation quantique est venu sur la table, il y a donc eu deux points

de vue différents : une petite communauté nourrie de relativité générale, et une grande communauté nourrie de la théorie quantique des champs. Ce clivage culturel est toujours là. Lors des discussions, on trouve toujours des « cordistes » qui vous disent : « Vous ne comprenez pas vraiment la théorie quantique des champs », et des « bouclistes » qui répondent : « Et vous ne comprenez rien à la relativité générale ! » Peut-être y a-t-il quelque chose de vrai dans les deux accusations... L'avenir tranchera.

Finalement, la théorie des cordes et la théorie des boucles pourraient s'avérer complémentaires. Le mérite de la théorie des cordes est de fournir une unification très élégante des interactions de la physique. Son talon d'Achille est de ne pas encore avoir été capable de trouver une formulation générale claire à un niveau fondamental, sans qu'il y ait un espace de référence, extérieur à la théorie. La théorie des boucles maîtrise précisément les outils qui permettent de définir la physique indépendamment de tout espace de référence – puisque l'espace émerge de sa structure même. Une sorte de fusion des deux approches n'est pas inconcevable, même si elle se présente aujourd'hui comme techniquement très compliquée. Malgré leur différence de perspectives, les deux théories ont indéniablement des points communs, en particulier l'idée centrale selon laquelle ce sont des objets à une dimension qui sont le support du champ gravitationnel à l'échelle fondamentale, qu'on les appelle cordes ou boucles.

Il y a d'autres idées et développements en cours, en dehors des cordes et des boucles. En particulier, Alain Connes a développé une autre description mathématique possible de l'espace physique, la « géométrie non commutative », très fortement motivée par la structure des forces qui agissent sur les particules élémentaires (le modèle standard). C'est un peu la même démarche que la découverte par Einstein de la relativité restreinte, inspirée par la théorie de Maxwell sur la force électromagnétique. J'ai étudié ces idées d'Alain et j'y ai contribué par quelques articles très marginaux. Ma conclusion est que je ne serais pas du tout surpris si la géométrie non commutative faisait partie, d'une manière ou d'une autre, de la synthèse que nous cherchons.

D'autres idées très intéressantes sur la gravité quantique ont été proposées par Roger Penrose, l'inventeur des réseaux de spin. Je recommande très vivement son livre de vulgarisation paru en français en 2007, *À la découverte des lois de l'Univers*, parfois un peu difficile, mais qui constitue une fresque immense et pénétrante sur tout ce que nous savons du monde.

Les relations entre le monde des cordes et celui des boucles sont parfois un peu orageuses et il n'est pas rare du tout d'assister à des

volées d'accusations parfois démesurées (« Ils n'y comprennent rien ! », « Leurs calculs sont tout à fait faux ! », « Leurs travaux sont truffés d'erreurs ! ») même, hélas, dans les comités scientifiques chargés de répartir les financements et les postes pour les jeunes chercheurs. Mais il est normal qu'il y ait de la confusion dans un domaine qui est à la pointe extrême de la recherche, et que d'âpres controverses se développent, parfois jusqu'à l'irrationalité, entre des gens qui ont consacré des années à leur passion de la recherche selon une voie déterminée. Pour peu qu'on reste dans une exactitude scientifique, la polémique, même rude, est un ingrédient nécessaire à la fertilité et à l'avancement de la connaissance.

Théories établies et théories hypothétiques

En effet, il est très important de dire que toutes ces théories restent hypothétiques. Chacune court le risque de se révéler complètement fausse. Et je ne veux pas seulement dire par là qu'elles pourraient être dépassées par une théorie plus performante, mais, bien plus radicalement, que toutes leurs prédictions pourraient être infirmées par l'expérience. La nature n'a que faire de nos jugements esthétiques. L'histoire de la physique théorique est pleine de flambées d'enthousiasme pour des théories « très belles » qui ont tourné à l'échec. Le seul arbitre est l'expérience, et à l'heure actuelle, il n'existe pas le moindre résultat expérimental qui soutienne, même indirectement, ni l'une ni l'autre des théories concurrentes pour prendre la place du modèle standard et de la relativité générale. Au contraire, toutes les prédictions qui ont été formulées par des théories allant plus loin que le modèle standard et la relativité générale (désintégration du proton, particules supersymétriques, particules exotiques, corrections à la force gravitationnelle à courte distance...) sont pour l'instant *démenties* par l'expérience. Lorsqu'on compare ces échecs avec l'immense succès expérimental de la mécanique quantique, du modèle standard et de la relativité générale, il y a de quoi inciter à la prudence.

C'est l'un des aspects les plus difficiles d'un travail comme le mien : il y a d'une part l'enthousiasme de formuler une nouvelle théorie, et l'excitation de se sentir sur le point de comprendre un nouvel aspect du monde ; d'autre part, il y a la frustration de travailler toute sa vie sur des théories potentiellement fausses. Ou, pire encore, il y a le risque de ne jamais savoir si elles sont vraies.

Je pense qu'en ce qui concerne la science contemporaine, il est important d'établir une distinction claire entre ce que nous savons et ce que nous conjecturons. Ce que nous savons aujourd'hui du monde physique tient à une poignée de théories fondamentales qui sont

établies et fonctionnent parfaitement dans leur domaine.

La distinction quelquefois un peu floue entre théories établies et spéculatives, évolue continuellement, mais n'en reste pas moins essentielle. Une théorie n'est établie qu'après de nombreuses confirmations expérimentales de prédictions spécifiques. La mécanique quantique (avec la théorie quantique des champs, qui en est l'application aux champs physiques), le modèle standard des particules élémentaires, la relativité générale d'Einstein sont des théories aujourd'hui établies. Nous pouvons ajouter à cette liste les théories plus anciennes comme la mécanique classique ou l'électromagnétisme. Ces théories ont fait leurs preuves, elles sont le fondement de la technique contemporaine. Sur leurs prédictions (dans leur domaine de validité), vous pouvez jouer votre argent ou votre vie avec confiance.

Tout ce qui va au-delà, comme la gravité quantique, la théorie des cordes, la géométrie non commutative, les modèles d'unification des forces fondamentales, la supersymétrie, les univers avec dimensions supplémentaires, les multivers etc. (y compris la presque totalité de mon propre travail de recherche), est et reste spéculatif. Rien ne nous assure que ces hypothèses décrivent correctement notre monde : elles n'ont aucune confirmation expérimentale, n'ont jamais été utilisées concrètement, et seul un fou se risquerait à parier quoi que ce soit sur la validité de leurs prédictions.

Cela ne signifie pas que ces théories ne sont pas intéressantes : les théories aujourd'hui établies furent autrefois spéculatives et incertaines. Toutefois, nous ne savons pas si les théories qui sont aujourd'hui explorées seront les bonnes : ce ne serait pas la première fois qu'une théorie adoptée par un grand nombre de scientifiques et qui mobilise passions, loyauté et ressources, se révèle, à l'épreuve des faits, une fausse piste.

Chaque chercheur a ses idées et convictions (j'ai les miennes) et chacun doit défendre ses hypothèses avec passion et énergie : la discussion animée est la meilleure façon de chercher la connaissance. Mais la défense de son propre point de vue ne doit pas nous aveugler : nous pouvons avoir tort. C'est l'expérience, et non pas le nombre ou la dialectique, qui tranche.

Les scientifiques communiquent souvent de façon erronée. Fascinés par leurs idées, ils ne distinguent pas, dans leur discours, une théorie établie d'une théorie spéculative. Ils présentent souvent leurs hypothèses comme si elles étaient des découvertes acquises. Cela n'est pas correct envers la société qui finance nos recherches. Un manque de clarté sur le caractère hypothétique des théories présentées décrédibilise la science. La théorie des cordes, par exemple, est parfois

présentée comme si elle était avérée.

Je pense qu'un grand tort est fait à la science lorsque des vulgarisateurs présentent des théories comme établies alors qu'elles sont seulement hypothétiques. Il faut que le public puisse faire confiance aux scientifiques, et ceux-ci doivent se montrer très prudents avant d'annoncer qu'ils « ont compris » quelque chose de nouveau.

J'insiste aussi sur ce point parce que j'ai le sentiment que la confusion entre théories établies et théories spéculatives se répand même à l'intérieur de la communauté scientifique. L'effet de cette grave dérive est particulièrement néfaste sur l'éducation des jeunes chercheurs. Lors d'une récente conférence internationale, je parlais à un jeune chercheur techniquement brillant. La discussion concernait deux théories : la relativité générale et une certaine théorie « de Yang-Mills supersymétrique $N = 4$ ». Quand j'ai mentionné le fait qu'une des deux théories était vérifiée en tant que théorie physique, le jeune chercheur m'a demandé, très candidement : « Laquelle ? » Il ne plaisantait pas. Il ne comprenait pas la différence physique entre la relativité générale, qui a fourni un très grand nombre de prédictions nouvelles toutes vérifiées par l'expérience, et une théorie qui n'en a fourni aucune. Cette confusion introduit un malaise en physique fondamentale.

La clarté sur l'état hypothétique de la théorie des boucles, la théorie des cordes, ou sur tout ce qui est appelé « au-delà du modèle standard », est essentielle pour une science saine et une communication claire avec le public, car c'est la société qui finance la science.

Le soutien de la recherche fondamentale

Les programmes de financement de la science, partout dans le monde, sont de plus en plus axés sur le soutien de ce qui peut être utile au développement industriel et aux applications technologiques. Le soutien de la science pure est en chute libre.

C'est une politique à très courte vue. Si les dirigeants d'Alexandrie, ou les Medicis de Florence, s'étaient concentrés sur la recherche appliquée, ils auraient considéré les travaux d'Euclide ou de Galilée comme inutiles, et nous serions aujourd'hui dans une société ignorante et pauvre.

Des développements technologiques majeurs ont suivi tous les bonds en avant dans la compréhension du monde. Les exemples sont légion. Les bases de l'ingénierie moderne se trouvent dans les calculs de Newton concernant l'orbite de la Lune. La Révolution Verte en

agriculture est essentiellement la conséquence d'une curiosité gratuite au sujet de la transmission héréditaire. La radio et la télévision ont émergé d'une manière inattendue des travaux de Maxwell sur la nature de la lumière. La technologie des ordinateurs n'existerait pas sans les recherches du XX^e siècle sur l'« inutile » atome. Le système de localisation géographique (GPS) ne fonctionnerait pas sans les résultats des interrogations d'Einstein sur la nature du temps. Chaque secteur technologique de notre société moderne est le résultat de quelque recherche fondamentale dictée par la curiosité. L'histoire nous enseigne que la recherche fondamentale se développe seulement sous l'influence de dirigeants éclairés ayant compris son importance.

Mais, même indépendamment de l'utilité à long terme, l'Europe doit soutenir la recherche fondamentale si elle veut redevenir l'un des centres intellectuels du monde. L'Europe a hérité des Arabes la notion d'Université, et l'a magnifiquement développée, comme endroit où la connaissance est recherchée dans la liberté, et transmise de génération en génération. Les universités européennes d'aujourd'hui sont de pâles reflets de leur passé, et souvent de pâles copies des meilleures universités américaines. L'Europe devrait investir dans ses universités en tant que centres de culture.

Beaucoup de systèmes académiques européens récompensent les carriéristes qui connaissent bien les règles, bien plus que les jeunes chercheurs créatifs et originaux, qui les brisent.

Dans ce qu'on appelle « l'Amérique matérialiste », l'excellence intellectuelle et la recherche poussée par la curiosité sont fortement valorisées. Les Prix Nobel sont de plus en plus Américains, et les États-Unis exercent une influence culturelle de plus en plus grande sur le monde, avec des conséquences politiques majeures à long terme.

Il est bien possible que la force la plus puissante qui ait créé la civilisation, nous tirant hors des cavernes et nous libérant de l'adoration des pharaons, soit la *curiosité*. Il faut éviter que l'Europe perde sa curiosité vitale.

Pour revenir aux cordes et aux boucles, l'état actuel de la recherche fondamentale est donc la confusion. Nous avons de belles idées, et des théories bien développées, mais nous ignorons si elles sont justes.

Peut-être la bonne solution aux grands problèmes ouverts aujourd'hui, comme la réconciliation de la relativité générale et de la mécanique quantique, est-elle déjà connue ; il ne reste plus alors qu'à la vérifier. Peut-être, au contraire, un(e) jeune Einstein encore inconnu(e), et qui n'arrive même pas à obtenir un poste de chercheur, trouvera-t-il demain la bonne solution ? Ou peut-être vous reviendra-t-il à vous, lecteur ou lectrice de cet ouvrage, de trouver l'idée qui manque ?

La science dans le monde

Au printemps 2004, j'ai reçu une invitation qui m'a surpris. Le semestre de présidence du Conseil de l'Europe revenait aux Pays-Bas. À cette occasion, le Premier Ministre hollandais avait décidé d'organiser un « *Intellectual Summit* », un forum articulé en quatre conférences, pour stimuler le dialogue entre le « monde des idées » et les « décideurs », sur le sens et la pertinence de l'idée européenne, au moment où l'Europe s'élargissait. L'idée était de rassembler pour quelques jours des hommes de culture d'un côté avec des hommes du monde politique, diplomatique, des médias ou de l'industrie de l'autre, pour un échange d'idées sur l'identité de l'Europe, ses ambitions, et la direction idéale que le continent veut prendre.

J'ai participé, avec un très grand intérêt à deux de ces réunions, l'une à Varsovie et l'autre à Berlin. J'étais chargé, en particulier, de réfléchir et d'intervenir sur le rôle de la *science* dans la civilisation européenne. Les considérations qui suivent sont en partie le résultat de ces réflexions, et touchent à deux thèmes principaux. En premier lieu, le rôle de la pensée scientifique dans notre civilisation, au-delà des connaissances qu'elle a apportées et du développement technologique qu'elle a permis. En second lieu, l'Europe elle-même. Je les adapte ici comme chapitre final, sans aucune prétention de professionnalisme dans ces domaines, mais pour élargir et compléter le cadre de la science que j'ai cherché à dessiner.

La démocratie

Revenons au début de l'histoire, à Anaximandre, il y a vingt-six siècles en Turquie. Qu'y avait-il de particulier dans le monde grec, pour donner naissance à cette démarche d'enquête rationnelle du monde et d'exploration de nouvelles façons de le concevoir qu'est la science ? Vingt-six siècles, c'est bien loin, mais ce n'est certainement pas le début de la civilisation : la civilisation égyptienne existait *déjà* depuis presque vingt-six siècles, par exemple. Pourquoi personne d'autre qu'Anaximandre de Milet n'avait-il compris qu'au-dessous de la Terre il n'y avait rien ? Qu'y avait-il de particulier, il y a vingt-six siècles, dans les villes grecques de la côte turque ?

Au septième siècle avant Jésus-Christ, la jeune civilisation grecque est en pleine croissance. Elle arrive des millénaires après d'autres grandes

civilisations qui lui sont proches, l'Égypte et la Mésopotamie, et elle en a beaucoup hérité. Mais elle en est profondément différente aussi. Ces anciennes civilisations étaient ordonnées, stables et hiérarchiques. Le pouvoir était centralisé et la société se réglait sur la conservation d'un ordre stable. C'étaient des civilisations fermées, qui entraient peu en contact avec l'extérieur, sinon en cas de conflit et de guerre.

Le jeune monde grec, au contraire, est extrêmement dynamique, et en évolution continue. Il n'a pas de pouvoir centralisé. Chaque cité est indépendante, et, au sein de chaque cité, le pouvoir se renégocie en permanence parmi les citoyens. Les lois ne sont ni sacrées ni immuables : elles sont continuellement discutées, expérimentées et mises à l'épreuve. Les décisions sont prises en commun lors des assemblées. L'autorité revient avant tout à ceux qui sont en mesure de convaincre les autres par le moyen du dialogue et de la discussion. C'est un monde ouvert et capable d'absorber les civilisations voisines. Les Grecs, à la différence des Égyptiens et des Perses, voyageaient énormément.

Dans ce climat culturel profondément neuf est née une nouvelle idée de la connaissance : la connaissance rationnelle et critique. Une connaissance dynamique, qui évolue et qui ose remettre en question les idées traditionnelles, et qui se remet elle-même en question. La nouvelle autorité du savoir ne vient pas de la tradition, ni du pouvoir, ni de la force, ni du recours à des vérités éternelles, mais de la capacité à convaincre les autres de la justesse de son point de vue. La critique des idées acquises n'est pas interdite, mais au contraire souhaitée, c'est la source vive du dynamisme et de la force de cette pensée, et la garantie qu'elle continue à s'améliorer. C'est l'aube d'un monde nouveau.

Les règles de base de la recherche scientifique sont simples : tout le monde a le droit de parler. Einstein était un obscur commis au bureau des brevets lorsqu'il a produit des idées qui ont changé notre vision de la réalité. Les désaccords sont bienvenus : ils sont la source du dynamisme de la pensée. Mais ils ne sont jamais réglés par la force, l'agression, l'argent, le pouvoir ou la tradition. La seule façon de gagner est d'argumenter, de défendre son idée dans un *dialogue*, et de *convaincre* les autres.

Bien sûr, je ne suis pas en train de dépeindre ici la réalité concrète de la recherche scientifique dans sa complexité humaine, sociale et économique, mais plutôt les règles idéales auxquelles la pratique doit se rapporter. Ces règles sont anciennes ; nous les trouvons décrites avec passion dans la fameuse « Septième Lettre » de Platon, où celui-ci explique comment on peut chercher la vérité :

« Or, après beaucoup d'efforts, lorsque sont frottés les uns contre les

autres ces facteurs pris un à un : noms et définitions, visions et sensations, lorsqu'ils sont mis à l'épreuve au cours de contrôles bienveillants et de discussions où ne s'immisce pas l'envie, vient tout à coup briller sur chaque chose la lumière de la sagesse et de l'intelligence, avec l'intensité que peuvent supporter les forces humaines. »

La compréhension est à rechercher par un processus intellectuel sincère, par l'apprentissage, l'écoute de la nature et des autres. Le point central est la reconnaissance honnête (« sans mauvaise volonté ») du fait que nos représentations peuvent être fausses. Depuis Platon, nous avons parcouru un long chemin, mais nous sommes toujours dans la voie qu'il décrit : une quête idéale de connaissance par le *dialogue*, par la recherche d'un accord dans le cadre d'une discussion rationnelle.

Ses relations avec la démocratie, née dans le même lieu et au même siècle, son évidentes. Idéalement, la démocratie est le processus par lequel la personne qui prend les décisions est celle qui a été capable *d'argumenter* ses idées et de *convaincre* suffisamment de gens.

La démocratie est un idéal qui commande de ne pas écraser ses ennemis, mais de les écouter, de discuter avec eux, de chercher un terrain commun et une compréhension commune. Le mot de Voltaire : « Je ne suis pas d'accord avec ce que vous dites, mais je me battrai pour que vous puissiez le dire », est au cœur à la fois de la démocratie et de la méthode scientifique.

La science et la démocratie sont donc nées ensemble, exactement dans le même esprit, dans les mêmes lieux et à la même époque. Dans l'esprit de la rationalité sereine, de l'intelligence et du dialogue. Cet esprit de critique, de dialogue et de rationalité est l'un des piliers sur lesquels s'est construit notre monde.

Évidemment, en politique comme en science, il y a un fossé entre l'idéal et la réalité quotidienne. Mais ces idéaux sont liés : la façon la plus efficace que nous ayons trouvée jusqu'ici pour comprendre le monde (la science) et la meilleure façon que nous ayons trouvée d'organiser le processus de décision collective (la démocratie) ont de nombreux points communs : la tolérance, le débat, la rationalité, l'écoute du point de vue opposé, l'apprentissage, la recherche d'idées communes. Dans les deux cas, la règle centrale est d'avoir conscience que nous pouvons nous tromper, de conserver la possibilité de changer d'avis lorsque nous sommes convaincus par un argument, et de reconnaître que des vues opposées aux nôtres pourraient l'emporter.

Chaque pas en avant dans la compréhension scientifique du monde est aussi une subversion. La pensée scientifique a donc toujours quelque chose de subversif, de révolutionnaire. Chaque fois, nous redessignons

le monde, nous changeons la grammaire même de nos pensées, le cadre de notre image de la réalité. Le mot même de *révolution*, on le sait, a pris sa signification actuelle à partir du texte « révolutionnaire » de Copernic, qui s'intitulait *Sur les révolutions*, où le mot « révolutions » n'indiquait que les mouvements circulaires des planètes. Être ouvert à la connaissance scientifique signifie donc être ouvert au révolutionnaire, au subversif.

L'enseignement

À l'école, tout au contraire, la science est généralement enseignée comme une liste de « faits vrais » et de « lois vraies », ou comme un entraînement à la résolution de problèmes. Cette façon d'enseigner la science trahit la nature même de la pensée scientifique, l'esprit critique. Je pense que nous devrions enseigner l'esprit critique, et non le respect des manuels. Nous devons apprendre aux étudiants à mettre en doute les idées reçues et les professeurs, et non à les croire aveuglément. C'est de cette façon qu'on aidera les jeunes à croire en l'avenir et que l'on contribuera à former une société vivante et dynamique qui va de l'avant.

La science devrait être enseignée pour ce qu'elle est : une aventure humaine fascinante, un enchaînement de périodes de grande confusion, d'exploration patiente de nouvelles solutions, de sauts conceptuels vertigineux, d'éclairs de compréhension où les pièces du puzzle s'assemblent brusquement : la Terre bouge, l'information est stockée dans l'ADN, tous les êtres vivants ont des ancêtres communs, l'espace-temps est courbe... c'est une longue histoire pleine de magie et de beauté. L'enseignement de la science devrait être l'enseignement du doute et de l'émerveillement.

Le développement historique de la science n'a jamais été séparé du développement des arts, de la littérature et de la philosophie. Chaque domaine a contribué, et a en retour été nourri, par la compréhension du monde qui traverse la civilisation durant une période et dans un temps donnés. J'aimerais voir une école qui pousse les élèves à comprendre et apprécier l'aventure intellectuelle qui a conduit aux cathédrales gothiques et aux *Principia* de Newton, à la peinture siennoise du XIV^e siècle et à la biologie moléculaire, aux pièces de Shakespeare et aux mathématiques pures. Il s'agit du même héritage intellectuel et il n'a de sens que pris dans son ensemble.

Il y a autant de beauté, d'intelligence, d'humanité et de mystère dans une page de Schubert et dans une page d'Einstein. Tous deux nous disent quelque chose sur la façon de comprendre la réalité, quelque chose de profond, et d'en même temps éphémère, fragile et léger.

J'aimerais que les jeunes apprennent à apprécier les deux, et trouvent dans les deux des clés pour comprendre le monde et eux-mêmes.

Werner Heisenberg : La science a-t-elle quelque chose à offrir ?

Dans un texte surprenant écrit pendant les années 1960, quand le mot « globalisation » était encore largement inconnu, Werner Heisenberg, probablement le vrai initiateur de la mécanique quantique et certainement l'un des plus grands physiciens du XX^e siècle, écrit que ce qu'il voit se produire dans le monde est le rassemblement des peuples et des cultures dans un mélange global. Il salue cela comme un merveilleux développement, mais souligne immédiatement que les peuples vont craindre l'affaiblissement de leur identité, vont être troublés par la chute de leurs références culturelles, et que cela générera une instabilité mondiale. Il est remarquable qu'une analyse aussi lucide ait pu être écrite il y a quarante ans.

Dans un tel contexte, écrit Heisenberg, la science pure comptera pour peu de chose. Et pourtant, elle a peut-être quelque chose à offrir : les idéaux d'une communauté qui a reconnu depuis longtemps l'incomplétude de tous les points de vue et qui affronte régulièrement la chute des certitudes et des références culturelles. Les physiciens ont dû changer tellement souvent leurs idées de base qu'ils ont appris à vivre dans le doute et le manque de confiance absolue dans leur propre point de vue. C'est précisément ce que nous devons être capables de faire dans un monde qui multiplie les points de vue locaux sur une civilisation globale.

Aujourd'hui, de sombres nuages recouvrent la planète. Le niveau des inégalités et des injustices est plus grand que jamais, et continue d'augmenter. Les échos des certitudes religieuses qui séparent les hommes les uns des autres se multiplient chaque jour par la voix des leaders politiques de tous bords. Les gens se raccrochent à leurs identités locales, ont peur et se méfient les uns des autres. Les conflits se radicalisent. Les ennemis sont de plus en plus considérés comme les représentants du mal, et diabolisés des deux côtés. Les dépenses militaires augmentent fortement presque partout. La négociation est de plus en plus dépréciée.

J'assiste à cette poussée d'irrationalité avec une inquiétude et une tristesse profondes. La science est la reconnaissance de notre ignorance, de nos limites, et du fait que chez « l'autre » il y a plus à apprendre qu'à redouter. Que la vérité est à rechercher dans un processus d'échange, et non dans les certitudes ou dans la conviction, si commune, que « nous sommes les meilleurs ».

Sur les dix croisades parties d'Europe, neuf ont donné lieu à des guerres menées par les Croisés. La sixième croisade a été résolue par Frédéric II, grand Européen, simplement en négociant le contrôle de Jérusalem avec le sultan Malik al-Kamil. Le Pape, dépositaire d'une vérité qui n'admet pas de critique, était furieux.

Je crois qu'aujourd'hui, malgré les tensions, une civilisation mondiale est en train de prendre forme. Les civilisations, comme les hommes, fleurissent dans le mélange, et stagnent quand elles se renferment. C'est pour cela que la globalisation d'aujourd'hui est une merveilleuse chance pour l'humanité. Même si elle fait très peur. La force tranquille de la pensée scientifique, dynamique et rationnelle, qui est l'héritage profond de l'ancienne civilisation grecque, retrouvé et développé par l'Europe moderne, est, peut être encore plus que la littérature, les arts, ou la philosophie, le cœur de l'héritage culturel que l'Europe apporte au monde. Le dynamisme, la capacité à remettre en cause ses propres fondements qui a rendu la pensée scientifique si puissante et si fiable, est peut-être aussi l'une des racines du succès historique européen.

Bien sûr, les domaines dans lesquels l'approche scientifique s'applique directement sont limités. La science n'a qu'une pertinence marginale dans la plupart de nos problèmes sociaux ou personnels les plus vitaux. Mais la pensée scientifique a contribué à former notre société et sa pensée, et elle possède une valeur de fondation culturelle. C'est l'une des meilleures méthodes que l'humanité a mise au point pour se débarrasser des erreurs, et pour rassembler une connaissance qui peut être partagée.

L'Europe

Dans ce contexte, je vois le processus de formation de l'Europe comme l'idée très belle que nos identités et intérêts locaux ne sont pas menacés, mais qu'au contraire ils peuvent s'épanouir dans une communauté plus grande. Même si aujourd'hui cette idée est en difficulté, souvent sous la poussée des égoïsmes particuliers, je pense et j'espère que ce rêve pourra grandir. Mais à condition que l'identité européenne ne soit pas formulée *contre* le reste du monde.

L'Europe peut trouver son sens dans le monde futur, en donnant l'exemple et en promouvant à l'extérieur ce qu'elle cherche à pratiquer à l'intérieur : l'idée que les peuples peuvent vivre en paix malgré leurs différences et peuvent apprendre à régler leurs conflits et atténuer les injustices par la politique, le dialogue et la négociation.

Dans la civilisation commune qui est en train de prendre forme sur la planète, l'Europe est une composante majeure. Pour cette raison, le monde a une dette importante envers l'Europe. Mais la civilisation

n'est sûrement pas une affaire exclusivement européenne. Le monde a produit de nombreuses civilisations, dont certaines ont profondément affecté l'histoire de l'Europe et sa culture, et dont beaucoup ont été profondément affectées par la culture européenne. Certaines contribuent énergiquement à la civilisation mondiale en train de se former. D'autres non, parce que nous, Européens, les avons exterminées.

Si le monde a une dette culturelle envers l'Europe, il a un crédit bien plus grand, suite à trois siècles de prédation coloniale : de nombreux peuples exterminés en Amérique du Nord et du Sud, des millions d'Africains réduits en esclavage, plusieurs nations d'Asie détruites, des exploitations systématiques, des camps de travail, des viols, du racisme institutionnel commun à tous les pays européens avant la dernière grande guerre, et un système mondial d'inégalités économiques aiguës toujours en place. Les enfants ne sont pas responsables des crimes de leurs parents, mais le reste du monde nous regarde avec les yeux des enfants des victimes de cet immense crime. Ils voient nos privilèges actuels, dont les racines se trouvent aussi dans ce crime.

J'ai entendu avec une grande émotion Gerhard Schröder dire à Varsovie : « Nous baissions la tête de honte devant les crimes nazis ». L'Allemagne pose un jalon très fort en faisant passer la valeur de la coexistence civilisée avant la fierté nationale. J'aimerais voir l'Europe se hisser à ce niveau. Mon rêve serait que le Président européen soit capable de dire un jour que nous, Européens, nous baissions la tête de honte devant les crimes coloniaux.

Je suis italien, français, et européen. Je veux être européen, et citoyen du monde. Les identités ne sont pas antagonistes les unes aux autres : elles s'enrichissent les unes les autres. Si l'Europe signifie : devenir plus fort et défendre nos privilèges européens, cela ne m'intéresse pas. En revanche, si l'Europe reconnaît ses crimes et est capable de travailler pour la paix et la justice mondiales, pour un monde où l'agression est remplacée par le dialogue, alors je crois que l'Europe pourrait rallier le cœur encore hésitant de ses citoyens.

Dans ce cas, l'Europe pourrait peut-être constituer un pas vers notre rêve commun le plus ancien et le plus grand : un monde partagé où le dialogue l'emporte sur l'agression et la force.

Peut-être n'est-ce qu'un rêve, je le sais bien. Un fantasme de monde différent, qui n'est pas le monde réel. Mais ce que j'ai appris à travers la science, c'est qu'il n'y a pas un seul monde réel. Le monde n'est jamais ce que nous pensons, il change sous nos yeux.

C'est la rébellion des générations précédentes face aux visions du

monde acquises, leurs efforts à penser le neuf, qui ont bâti notre monde. Notre vision du monde, nos réalités, sont leurs rêves accomplis. Il n'y a pas de raison d'avoir peur du futur : nous pouvons continuer à nous rebeller, à rêver d'autres mondes possibles, et à les chercher.

Aujourd'hui, je suis entouré par des jeunes gens fascinés, comme je l'étais il y a plus de vingt ans, par la recherche fondamentale, et qui viennent me voir de tous les coins du monde, comme je l'ai fait, à l'époque, avec d'autres. Je leur parle, je leur explique ce que je sais, espérant que parmi eux il y aura celle ou celui qui sera meilleur que moi et atteindra ce que nous n'avons pas été capables d'atteindre.

Quand ils me demandent mon avis, je leur déconseille vivement d'entreprendre une carrière de recherche dans ce domaine, tout comme mes professeurs l'avaient fait avec moi. Je leur parle de la compétition acharnée pour les places, de la difficulté du sujet, des risques énormes de cette profession exigeante. Je leur dis qu'il est dangereux de ne suivre que ses passions. Mais, secrètement, j'espère qu'ils auront la passion et la force d'ignorer toutes les mises en garde et de poursuivre leurs rêves.

Remerciements

À part les personnes mentionnées dans ce livre, je voudrais remercier les très nombreux amis avec lesquels j'ai eu la chance de travailler, et qui ont développé les idées et les résultats décrits ici : John Baez, Julian Barbour, John Barrett, Mauro Carfora, Louis Crane, Roberto DePietri, Hugo Morales-Tecotl, Giorgio Immirzi, Ted Jacobson, Gianni Landi, Jerzy Lewandowski, Renate Loll, Massimo Pauri, Jorge Pullin, Michael Reisenberger, Massimo Testa et Thomas Thiemann, et plus encore ceux avec qui j'ai la chance de travailler aujourd'hui : Emanuele Alesci, Eugenio Bianchi, You Ding, Bianca Dittrich, Jonathan Engle, Ed Wilson-Ewing, Winston Fairbairn, Muxin Han, Frank Hellmann, Thomas Krajewski, Kirill Krasnov, Elena Magliaro, Antonino Marcianò, Daniele Oriti, Roberto Pereira, Claudio Perini, Matteo Smerlak, Francesca Vidotto, Wolfgang Wieland et Mingyi Zhang.